Revista Internacional de
Ingeniería
de Estructuras

Vol. 24, 1, 73-107 (2019)

DESCRIPTION OF THE SEISMIC ANALYSIS OF A STRUCTURE WITH TADAS DISSIPATORS

Roberto Aguiar[1,2], Fernando Del Castillo[3]

[1]Profesor. Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción. Universidad de Fuerzas Amadas ESPE. Av. Gral. Rumiñahui s/n, Valle de los Chillos. rraguiar@espe.edu.ec
[2]Carrera de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.
[3]Constructora del Castillo, Manta, delcastilloborja@gmail.com

Received: January 2019. Accepted: March 2019

ABSTRACT

The main objective of this article is to describe the procedure of the seismic analysis of a structure with TADAS dissipaters, for which it is better to work in two dimensions, if it is done in three dimensions, the didactic part is complicated

The explanation is carried out in the reinforcement of the Ex Parking Place of the Laica Eloy Alfaro de Manabi University, ULEAM, where only steel diagonals have been placed over inverted V-shaped windscreens on the ground floor; two TADAS dissipaters on each of the second-story windscreens and a TADAS dissipaters on the third and fourth floor windscreens. All the steel braces have been placed in the four corners of the structure, in such way that there are 8 windings per floor and 16 TADAS in the second floor; 8 TADAS on the third floor and the same amount on the fourth floor.

Key Words: Seismic reinforcement of structures. TADAS dissipaters

DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS SÍSMICO DE UNA ESTRUCTURA CON DISIPADORES TADAS

RESUMEN

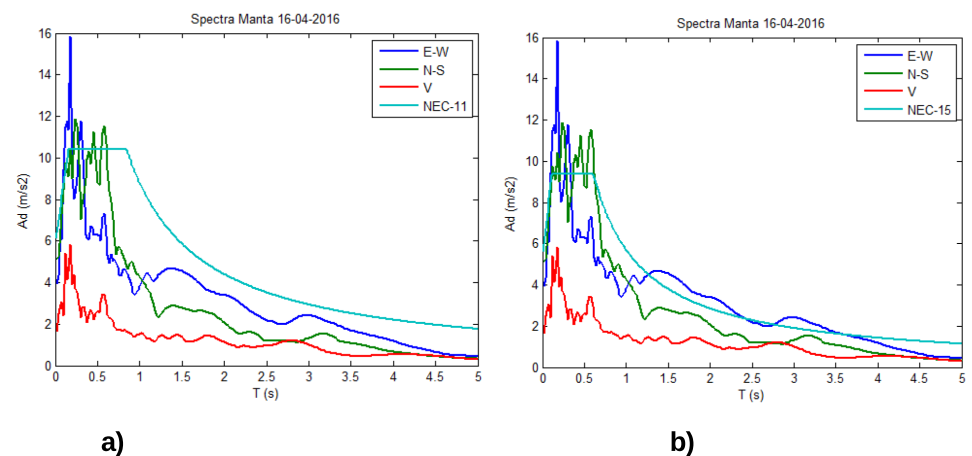
El objetivo principal de este artículo es describir el procedimiento del análisis sísmico de una estructura con disipadores TADAS, para lo cual lo mejor es trabajar en dos dimensiones, si se lo hace en tres dimensiones se complica la parte didáctica

La explicación se la realiza en el reforzamiento del Ex Parqueadero de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM, donde se han colocado solo diagonales de acero sobre contravientos en forma de V invertida en la planta baja; dos disipadores TADAS sobre cada uno de los contravientos del segundo piso y un disipador TADAS sobre los contravientos del tercer y cuarto piso. Todos los contravientos de acero se han colocado en las cuatro esquinas de la estructura, de tal manera que se tienen 8 contravientos por piso y 16 TADAS en segundo piso; 8 TADAS en tercer piso e igual cantidad en cuarto piso.

Palabras Claves: Reforzamiento sísmico de estructuras. Disipadores TADAS

1. INTRODUCCIÓN

En la figura 1 se presentan los espectros obtenidos en Manta del terremoto del 16 de abril de 2016 (M=7.8) y se comparan con los que reporta las Normas Sísmicas de 2011 y 2015 en un perfil de suelo tipo C (los acelerogramas de Manta fueron obtenidos en un perfil de suelo C), considerando PGA igual a $0.5\ g$. Se aprecia que las ordenadas espectrales del terremoto de 2016 son mayores que las obtenidas por el NEC-11 y NEC-15.



a) **b)**

Figura 1.11 Espectros obtenidos del terremoto de 2016 en Manta y se compara con los espectros: a) Del NEC-11; b) Del NEC-15

La gran interrogante que se tiene es con que espectro se refuerzan las estructuras que fueron afectadas por el terremoto de 2016, conociendo que el espectro del NEC-15 reporta valores bajos para un PGA igual a $0.5\ g$. Por este motivo es importante realizar un estudio de peligrosidad sísmica utilizando métodos probabilísticos y determinísticos.

No se realizó un estudio de peligrosidad sísmica para el emplazamiento del Parqueadero de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manta ULEAM que se halla sobre un perfil de suelo tipo D. Pero se hizo para las estructuras que fueron afectadas por el terremoto de 2016, de la empresa Molinos Superior, que se hallan a menos de 4 km, de la ULEAM y también se encuentra en un perfil de suelo D.

Para el estudio de peligrosidad sísmica, se utilizó las zonas fuentes propuestas por Parra (2016) ya que a esa fecha constituían el estado del arte en este tema, ahora el último trabajo es el de Beauval *et al.* (2018)

Por otra parte, se trabajó con las ecuaciones de movimientos fuertes de: Zhao *et al.* (2006) que se abreviará (Z06) cuya base de datos mayoritariamente son sismos registrados en Japón. Con el modelo de Abrahamson *et al.* (2016) que trabaja con sismos registrados en todo el mundo (A16) y con el modelo desarrollado por Haendel *et al.* (2015) que utiliza datos de sismos de Chile.

En la tabla 1 se presenta las combinaciones que serán utilizadas en el árbol lógico para la evaluación de la peligrosidad sísmica; destacando que se les asigna el mismo peso a todos los modelos, se indica además el régimen tectónico de aplicación. Rivas (2016)

Tabla 1 Modelos a ser utilizados en los tres regímenes tectónicos y el árbol lógico de cálculo de la Peligrosidad Sísmica.

Rama	Cortical	Interplaca	Intraplaca
ZZZ	Z06	Z06	Z06
ZHH	Z06	H15	H15
ZAA	Z06	A16	A16

En la figura 2 se presentan las leyes de atenuación que se tiene para un sismo de magnitud 7.8 (terremoto del 16 de abril de 2016) con los tres modelos de movimientos fuertes seleccionados, en un perfil de suelo tipo B (clasificación del NEC-15)

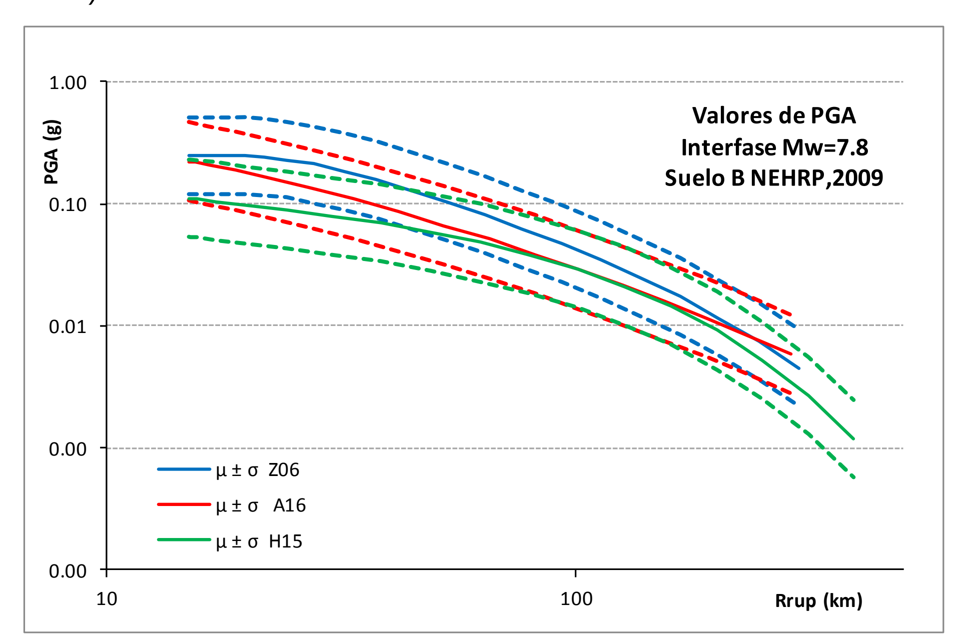


Figura 2 Leyes de atenuación en un suelo tipo B, para un terremoto de Magnitud 7.8.

El cálculo de la peligrosidad sísmica se realizó para un perfil de suelo sísmico B. De tal manera que las curvas de peligrosidad sísmica que relacionan la aceleración esperada del suelo, con la probabilidad de excedencia son las indicadas en la figura 3, que viene a ser el resultado del análisis sísmico, utilizando el programa de computación CRISIS (Ordaz *et al.* 2013).

Con la gráfica de la figura 3, se puede obtener espectros de peligro sísmico uniforme, para cualquier período de retorno. Espectros UHS (**U**niform **H**azard **S**pectrum)

Se encontró en primer lugar los espectros en un perfil de suelo B, y posteriormente se obtuvo los espectros para un perfil de suelo D, utilizando los factores de sitio de NERHP (2009). Actualmente hay una publicación reciente que es la NEHRP (2015).

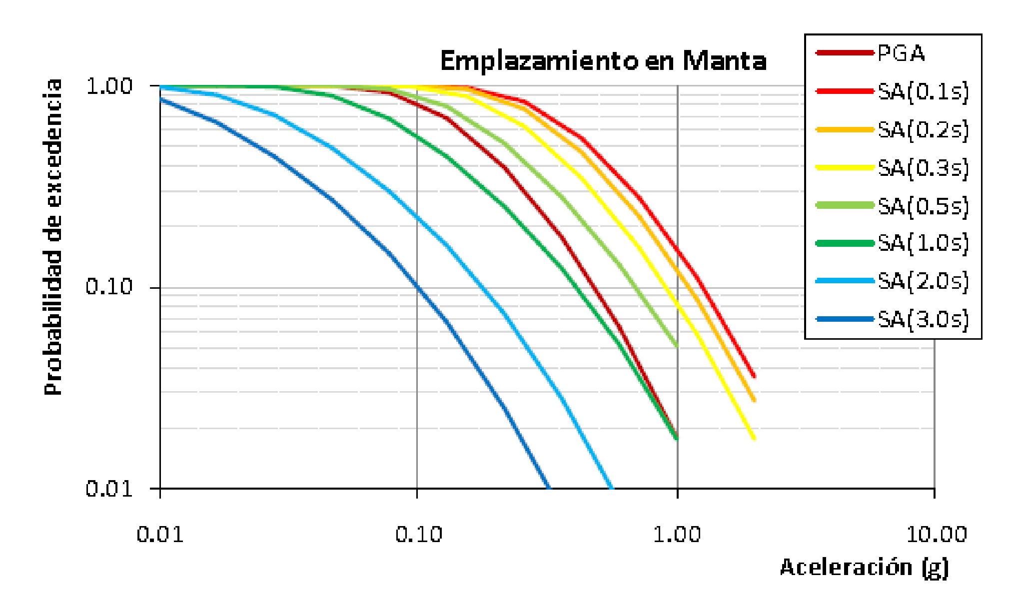


Figura 3 Curvas de Peligrosidad Promedio para Molinera Superior en un perfil de suelo tipo B (Roca). Fuente: Rivas (2016)

Los espectros de Peligro Sísmico Uniforme para 475 y 975 años de período de retorno, que se denominarán DBE y MCE, respectivamente se indican en la tabla 2, como una fracción de la gravedad.

Tabla 2 Espectros de Diseño DBE y Máximo Considerado MCE, con los que se diseñó el reforzamiento de Parqueadero de ULEAM

T (s)	**DBE (g)**	**MCE (g)**
0.0	0.5	0.7
0.1	1.3	1.7
0.2	1.2	1.5
0.3	1.0	1.3
0.5	0.8	1.1
1.0	0.6	0.8
2.0	0.3	0.4
3.0	0.2	0.2

Por otra parte, en la figura 4 a, se muestran los espectros DBE y MCE, conjuntamente con el que reporta NEC-15 para un perfil de suelo D. Nótese que el espectro MCE reporta ordenadas espectrales mayores en prácticamente todos los rangos de períodos con relación al de NEC-15.

En la figura 4 b, se presentan los espectros DBE y MCE; conjuntamente con los espectros hallados con los registros de Manta, para las dos componentes de movimiento horizontal del suelo EW y NS. Se aprecia que el espectro MCE cubre las dos componentes de los espectros de Manta del terremoto de 2016, de tal

manera que es una garantía considerar estos espectros en el diseño del reforzamiento.

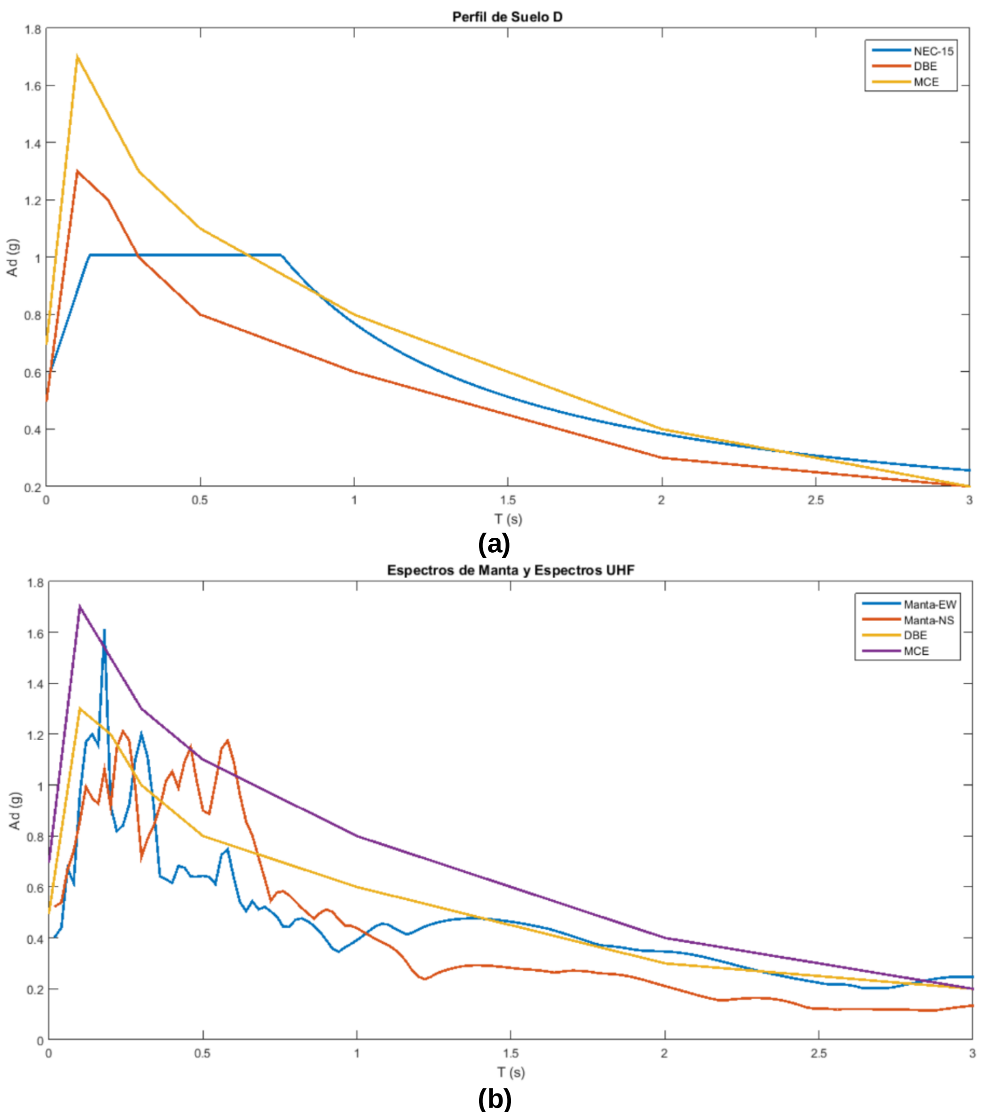
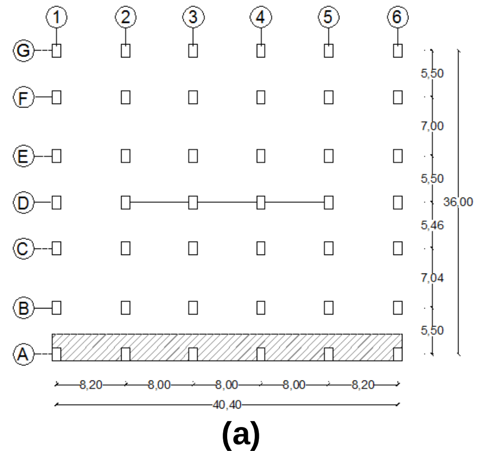


Figura 4 a) Espectros de Peligro Sísmico Uniforme DBE y MCE conjuntamente con espectro de NEC-15 para perfil de suelo D; b) Espectros DBE, MCE con espectros hallados con registros de Manta del terremoto de 2016.

2. ANÁLISIS SÍSMICO PÓRTICO A. DURANTE TERREMOTO

Con el propósito de ilustrar el análisis sísmico de la estructura con disipadores TADAS, se realiza en este apartado un análisis sísmico plano del Pórtico A, durante el terremoto del 16 de abril de 2016 (M=7.8). Para ello en la figura 5 a, se presenta el mencionado pórtico con el área cooperante con la cual se obtuvo

la matriz de masas; en la figura 5 b, se indica el pórtico que se está analizando (sin los antepechos, que fueron derrocados).



(a)



(b)

Figura 5 a) Vista en planta de la estructura; b) Fotografía del Pórtico A.

Se realizó el análisis sísmico considerando un hormigón de 24 MPa. Por otra parte, la carga muerta $D = 0.96\ T/m^2$, la carga viva $L = 0.5\ T/m^2$ (carga de parqueadero) para el cálculo de la matriz de masas se trabajó con el 25% de la carga viva. Con esta información en la figura 6 a, se muestra en primer lugar el modelo de un grado de libertad por piso y a la derecha la carga uniforme con la cual se halla la matriz de masas.

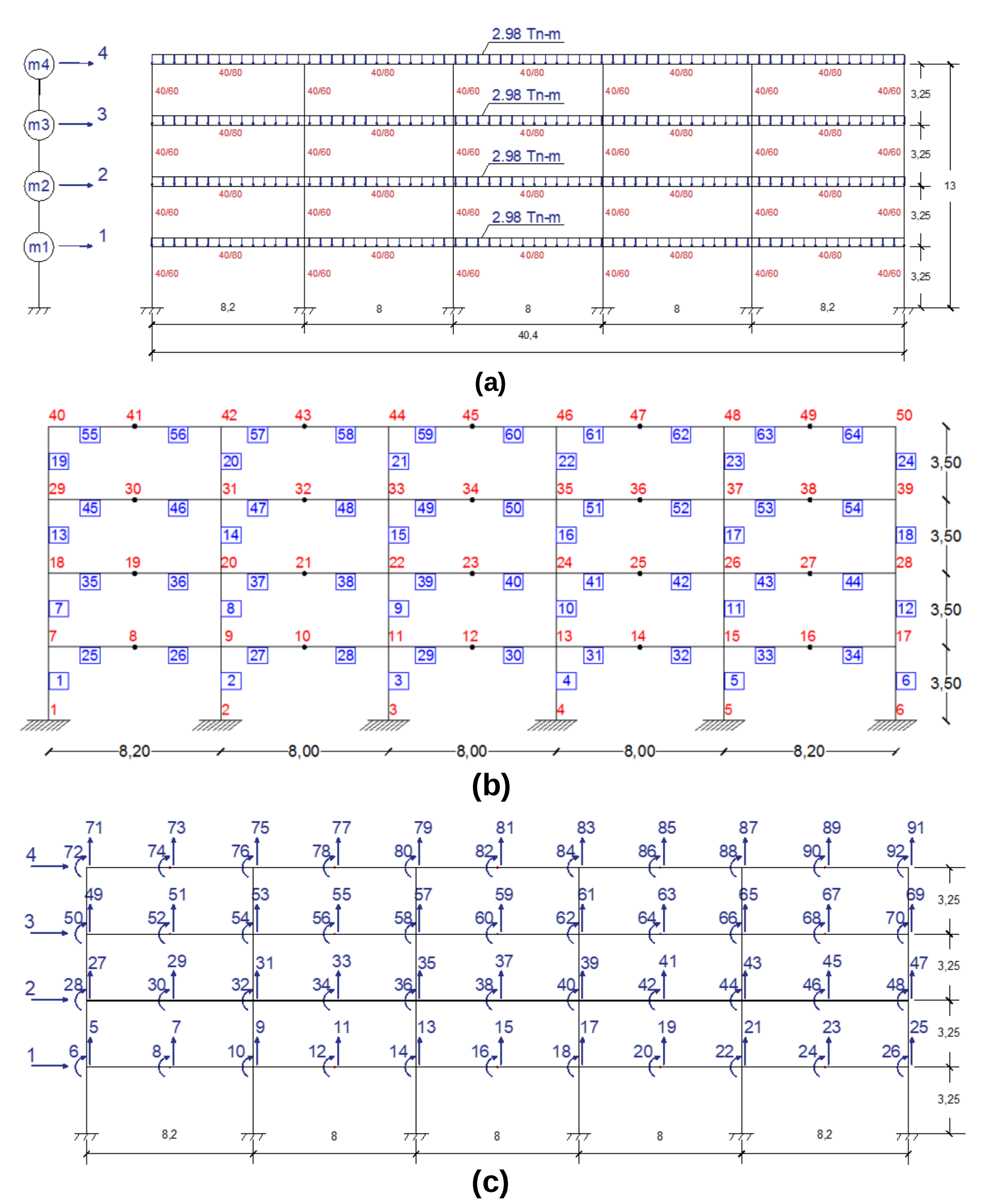


Figura 6 a) Modelo numérico de análisis con dimensiones de vigas, columnas y carga vertical; b) Numeración de nudos y elementos; c) Grados de libertad.

En la figura 6 b, se presenta la numeración de nudos y elementos. Nótese que se ha considerado nudo en la mitad de las vigas, esto ayuda posteriormente a colocar las diagonales sin y con disipadores de energía. El programa de ***CEINCI-LAB*** denominado ***cg_sismo2*** permite obtener los grados de libertad indicados en la figura 6 c.

En base a la numeración de los nudos en la figura 6 c, se indica los grados de libertad. Primero se ha numerado las coordenadas principales de abajo hacia arriba.

Con la matriz de rigidez lateral y con la matriz de masas se halló que **el período fundamental es 0.645 seg.** Los modos de vibración encontrados se indican en la figura 7.

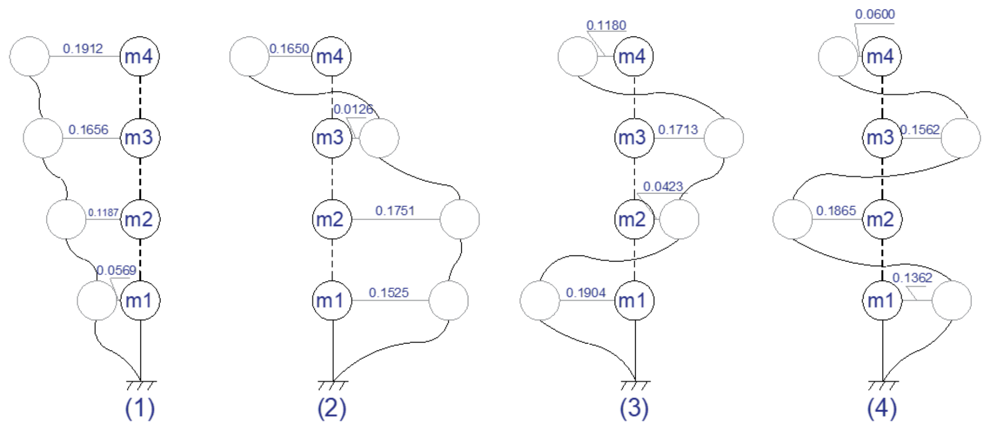


Figura 7 Modos de vibración de Pórtico Plano A

En la tabla 3 y figura 8, se indican los desplazamientos q y derivas de piso γ, en el pórtico A, durante el terremoto del 16 de abril de 2016. El mayor desplazamiento que se obtuvo fue de 10.40 cm, en el último piso y las mayores derivas de piso son de 0.96 % y 1.03%, en los pisos 1 y 2, que a la larga fueron los que más daño sufrieron, todo esto ante la componente N-S.

Tabla 3 Desplazamientos q y derivas de piso γ, ante el espectro obtenido en Manta del terremoto del 16 de abril de 2016.

Piso	Componente E-W		Componente N-S	
	q (cm)	γ $(\%)$	q (cm)	γ $(\%)$
1	2.12	0.65	3.12	**0.96**
2	4.39	0.70	6.47	**1.03**
3	6.10	0.53	9.00	0.78
4	7.05	0.29	10.40	0.43

Nótese que la deriva del tercer piso es 0.78% y del cuarto 0.43%, que también tuvieron daño. En la figura 5 se presentan los desplazamientos laterales máximos y las derivas de piso, en el Pórtico A, durante el terremoto de 2016.

En la columna A2 (ver figura 5 a) del primero y segundo piso, al inyectarla con resina epóxica el fluido viscoso atravesó toda la cara de la columna, esto significa que internamente tuvo gran daño.

No se tuvo daño en vigas debido a que estas son de 40/80 cm, tienen mayor sección de las columnas que son de 40/55 cm; la resina epóxica atravesó el lado de 55 cm.

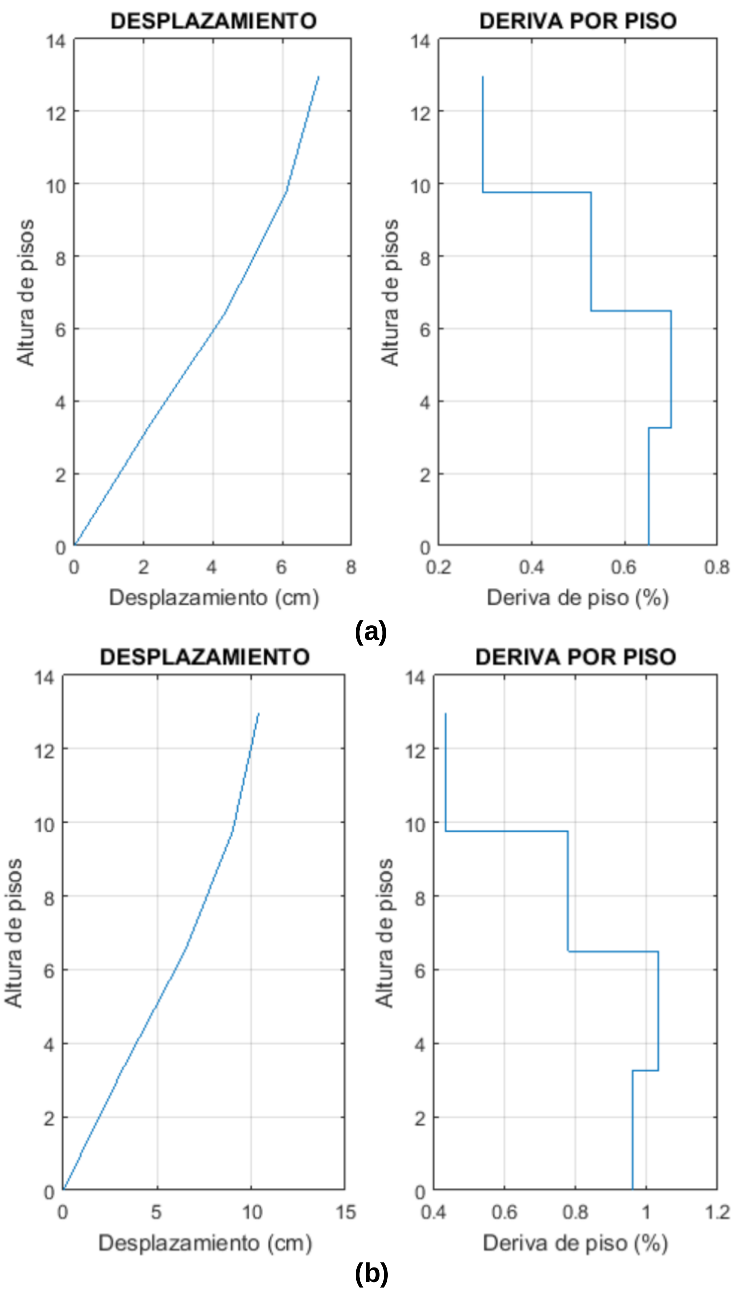


Figura 8 Desplazamientos y Derivas de Piso, en el Pórtico A, durante el terremoto de; a) Respuesta ante componente E-W; b) Respuesta ante componente N-S.

El reforzamiento, contempla la colocación de diagonales en la planta baja y disipadores de energía sobre diagonales en forma de V invertida en los pisos 2 a 4. Por esta razón en el siguiente apartado se realiza el análisis sísmico de la estructura solo con diagonales de acero de 250/250/18 mm, en la planta baja para poder ilustrar el análisis con los disipadores de energía.

Pero antes en la figura 9 se presenta en forma resumida el proceso constructivo de las diagonales de acero en forma de V invertida en la planta baja (ver leyenda de figura 9). En total se colocaron diagonales en 8 vanos, todo esto en 7 días laborables.

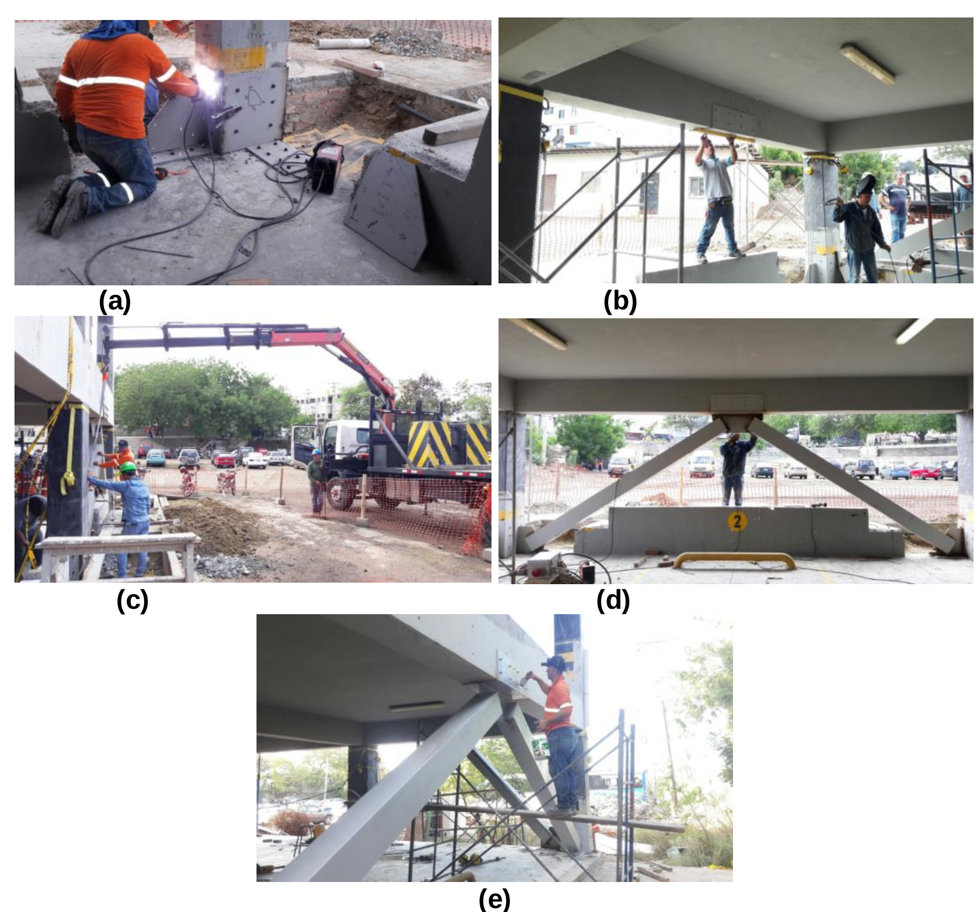


Figura 9 Construcción de diagonales de acero en planta baja; a) Collarín con placas verticales de 60 cm, de alto; las placas que reciben a la Placa Gusset son de 15 mm, de espesor, las restantes de 10 mm; b) Colocación de las placas en la viga de hormigón armado, los pernos de anclaje van en los lados de la viga; c) Se aprecia en la fotografía que la Placa Gusset superior ha sido ya colocada y con la ayuda de una grúa están colocando las diagonales; d) Vista de collarín, placas Gusset y diagonales; e) Pintura anticorrosiva en los elementos de acero.

3. ANÁLISIS SÍSMICO PÓRTICO A CON DIAGONALES DE ACERO EN LA PLANTA BAJA

En la fotografía de la figura 10 a, se presenta el Pórtico A, con los contravientos, colocados en los vanos exteriores. Todavía no se ha colocado los

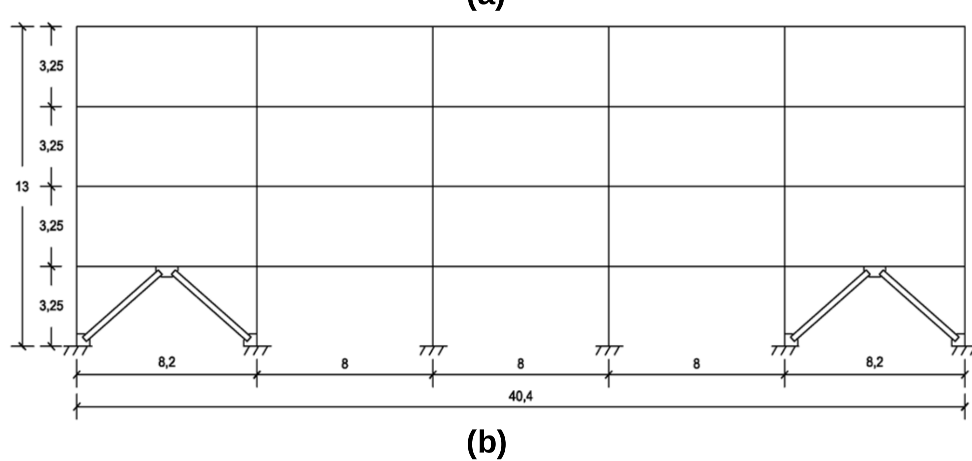
disipadores de energía en los pisos superiores de ese mismo vano. En la figura 10 b, se indica el modelo numérico de análisis sísmico.

Pero ahora ya no se va a trabajar con los espectros obtenidos con los registros sísmicos de Manta, del terremoto de 2016, sino que se analiza con los espectros de peligro sísmico uniforme denominados DBE y MCE.

El cálculo se lo realizó en forma espacial pero el objetivo de este artículo es ilustrar el análisis sísmico de una estructura con disipadores de energía TADAS, para ello lo más fácil es presentar un caso plano.



(a)



(b)

Figura 10 Pórtico A; a) Fotografía con diagonales en planta baja; b) Modelo de análisis sísmico

A futuro la estructura dejará de ser parqueadero y se convertirá en Edificio Administrativo. En los sitios donde existen las rampas van a ser Auditorios. Por este

motivo las nuevas cargas vivas de análisis son $L = 250\ \frac{kg}{m^2}$ para las oficinas y $L = 300\ \frac{kg}{m^2}$ para los auditorios. Por otra parte, si bien es cierto se ha minorado peso con el derrocamiento de los antepechos y posteriormente se colocará antepechos tipo Steel Framing que son mucho más livianos. No es menos cierto que se ha incrementado el peso con los contravientos por lo que la carga muerta D se mayoró en 5%

En la tabla 4 se presentan los desplazamientos laterales q del Pórtico A, ante los espectros DBE y MCE; con la colocación de las diagonales a secas la planta baja pasa a ser muy rígido y prácticamente no se desplaza nada, ver figura 11; la deriva de piso γ es muy baja en P.B.

Con la colocación de diagonales de acero no habrá daño en la P.B., pero el daño se traslada al segundo y tercer piso. Más daño se tiene en el segundo piso por lo que en ese piso se colocarán dos disipadores TADAS y en los siguientes pisos 1 TADAS sobre cada contraviento en forma de V invertida.

El período de vibración fundamental del Pórtico A, solo con diagonales en la planta baja es de 0.53 s. Se recuerda que la estructura sin diagonales tuvo un período de 0.645 s., de tal manera que se rigidiza la estructura con las diagonales.

Tabla 4 Desplazamientos q; desplazamientos relativos q_r, derivas de piso γ, ante espectros DBE y MCE, de estructura solo con diagonales en P.B.

Piso	DBE			MCE		
	q (cm)	qr (cm)	γ $(\%)$	q (cm)	qr (cm)	γ $(\%)$
1	0.19	0.19	0.05	0.25	0.25	0.07
2	2.96	2.77	0.85	4.07	3.82	1.17
3	5.41	2.45	0.75	7.42	3.35	1.03
4	6.81	1.40	0.43	9.35	1.93	0.59

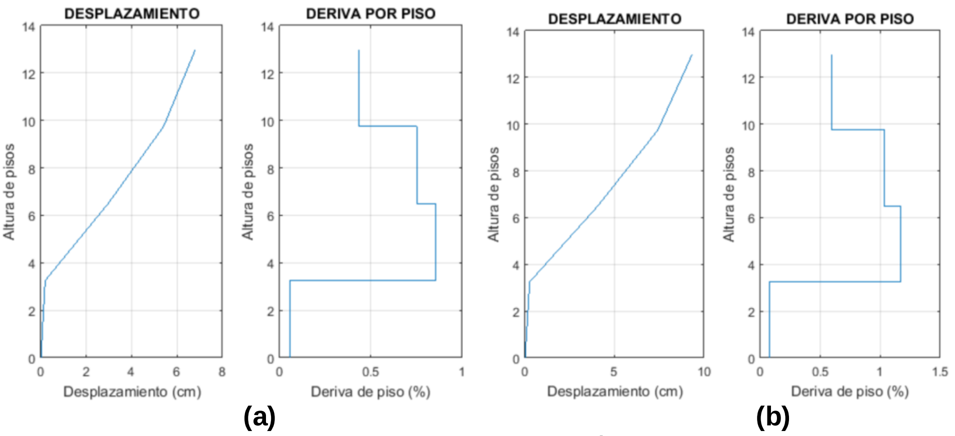
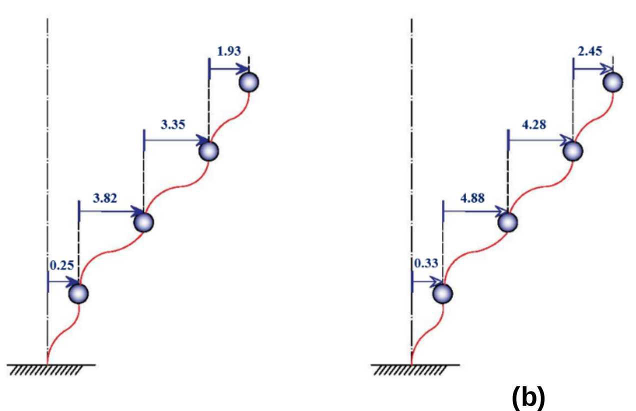


Figura 11 Desplazamientos y derivas de piso en Pórtico A, solo con diagonales de acero en Planta Baja; a) Espectro DBE; b) Espectro MCE

Para el análisis sísmico de la estructura con disipadores de energía se necesita conocer los desplazamientos relativos q_r ya que la rigidez efectiva de los disipadores es función de q_r. Por este motivo en la figura 12 muestran los desplazamientos relativos para el caso de la estructura con diagonales en P.B.



(a) **(b)**

Figura 12 Desplazamientos relativos de Pórtico A; a) Ante sismo de diseño DBE; b) Ante sismo máximo considerado.

4. DISIPADORES TADAS SOBRE CONTRAVIENTOS

En Aguiar *et al.* (2016, 1) se presenta el marco teórico sobre el análisis sísmico de estructuras con disipadores TADAS y en Aguiar (2018) se presenta mayor información sobre la constitutiva del disipador TADAS que se indica en la figura 13, que se emplea en el reforzamiento del Parqueadero de ULEAM. Las dimensiones de este disipador son:



Figura 13 Disipadores TADAS de 6 placas a usar en el reforzamiento del Parqueadero de la ULEAM.

$$b = 17\ cm; \quad h = 17\ cm; \quad t = 2.5\ cm; \quad n = 6; \quad f_y = 3240\ \frac{kg}{cm^2}; \quad E_s = 2100000\ \frac{kg}{cm^2}$$

Donde $b, h, t,$ son la base, altura y espesor de una placa triangular del TADAS; n es el número de placas del disipador, para el presente caso $n = 6$, con

un solo TADAS de 6 placas; f_y es el límite de fluencia del acero A36, obtenido en Chile (Aguiar, 2019); E_s, es el módulo de elasticidad del acero.

Por otra parte, las ecuaciones que definen el modelo bilineal del TADAS se indican a continuación, no sin antes indicar que todas estas ecuaciones son deducibles a partir de la resistencia de materiales (Aguiar *et al.* 2016).

$$F_y = n \frac{f_y \; b \; t^2}{6 \; h} \tag{1}$$

$$q_y = \frac{f_y h^2}{E_s t} \tag{2}$$

$$K_e = n \frac{E_s \; b \; t^3}{6 \; h^3} \tag{3}$$

Las variables todavía no definidas son $\boldsymbol{F_y}, \boldsymbol{q_y}$, que son la fuerza y desplazamiento de fluencia del disipador; $\boldsymbol{K_e}$ es la rigidez elástica que también es igual a $\boldsymbol{F_y}/\boldsymbol{q_y}$

Ahora bien, la fuerza $\boldsymbol{F}$, asociada a un desplazamiento $\boldsymbol{q}$ en que puede trabajar el disipador, vale.

$$F = F_y + K_p \; (q - q_y) \tag{4}$$

Donde $\boldsymbol{K_p}$ es la rigidez plástica del modelo constitutivo del disipador que puede calcularse en función de la rigidez elástica $\boldsymbol{K_e}$

$$K_p = \alpha \; K_e \tag{5}$$

Donde $\alpha = 0.02$; Se recuerda que $\boldsymbol{F}$ tiene que ser menor que la fuerza total de plastificación $\boldsymbol{F_u}$, que viene dada por la siguiente ecuación.

$$F_u = \frac{f_y \; b \; t^2}{4 \; h} \tag{6}$$

La rigidez efectiva K_{ef} también conocida como rigidez secante se halla con la siguiente expresión.

$$K_{ef} = \frac{F}{q} \tag{7}$$

El análisis sísmico de una estructura con disipadores de energía se realiza en forma interactiva, es decir uno se impone un desplazamiento relativo en el disipador q en base al cual se determina la fuerza F, la rigidez efectiva K_{ef} y el factor de amortiguamiento equivalente ξ_{eq}, Con estos dos últimos valores se procede a realizar el análisis sísmico y al final se obtiene el desplazamiento relativo en el disipador, el mismo que se compara con los impuestos, si son parecidos se termina

el cálculo, caso contrario se vuelve a calcular: K_{ef} y ξ_{eq}. Esto se ilustra en el siguiente apartado.

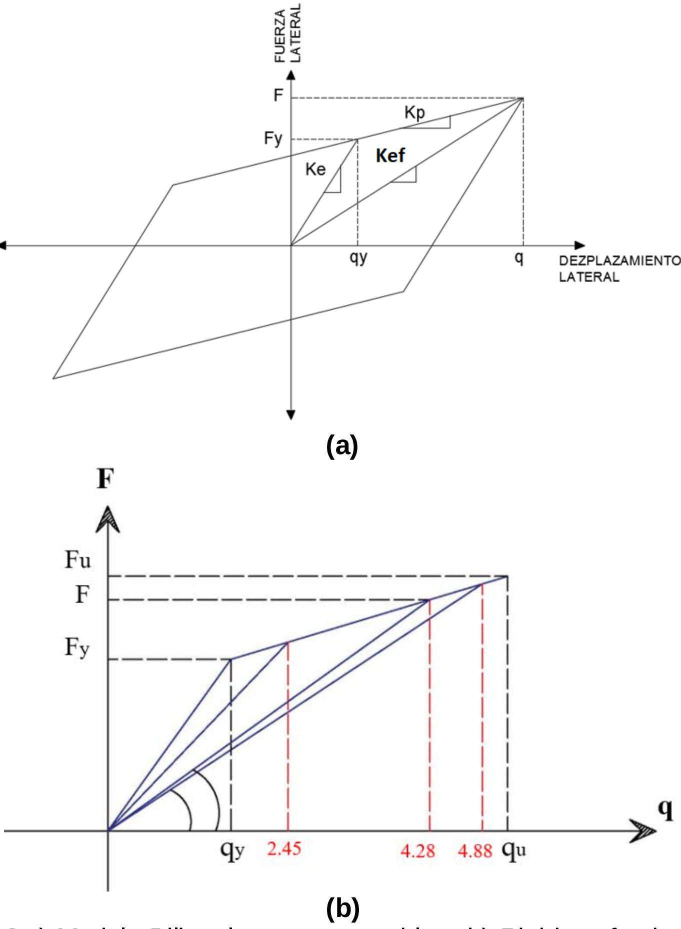


Figura 14 a) Modelo Bilineal y puntos notables; b) Rigidez efectiva para los desplazamientos relativos encontrados con el espectro MCE, en el apartado anterior.

En la figura 14 a, se presenta el modelo bilineal de un disipador TADAS, no se ha colocado el punto F_u. Ahora, en la figura 14 b, se indican las rigideces efectivas K_{ef} que se obtienen con cada uno de los desplazamientos relativos del Pórtico A, solo con diagonales en la P.B.

Se puede realizar el análisis sísmico, considerando al disipador como un elemento más de la estructura, esta es una alternativa; otra es encontrar una rigidez equivalente K_{eq} del conjunto formado por el disipador y las diagonales de acero, para ello en la figura 15 a, se presenta, la rigidez efectiva K_{ef}, la misma que se divide para 2, para tener una rigidez asociada a cada diagonal que dicho sea de paso tiene una rigidez K_{diag}, la misma que es axial al eje de la diagonal. Se hace un cambio de coordenadas de la rigidez K_{ef} que es horizontal a K_{dis} que es una rigidez axial del disipador, ver figuras 15 b y c. (Aguiar *et al.* 2016, 1)

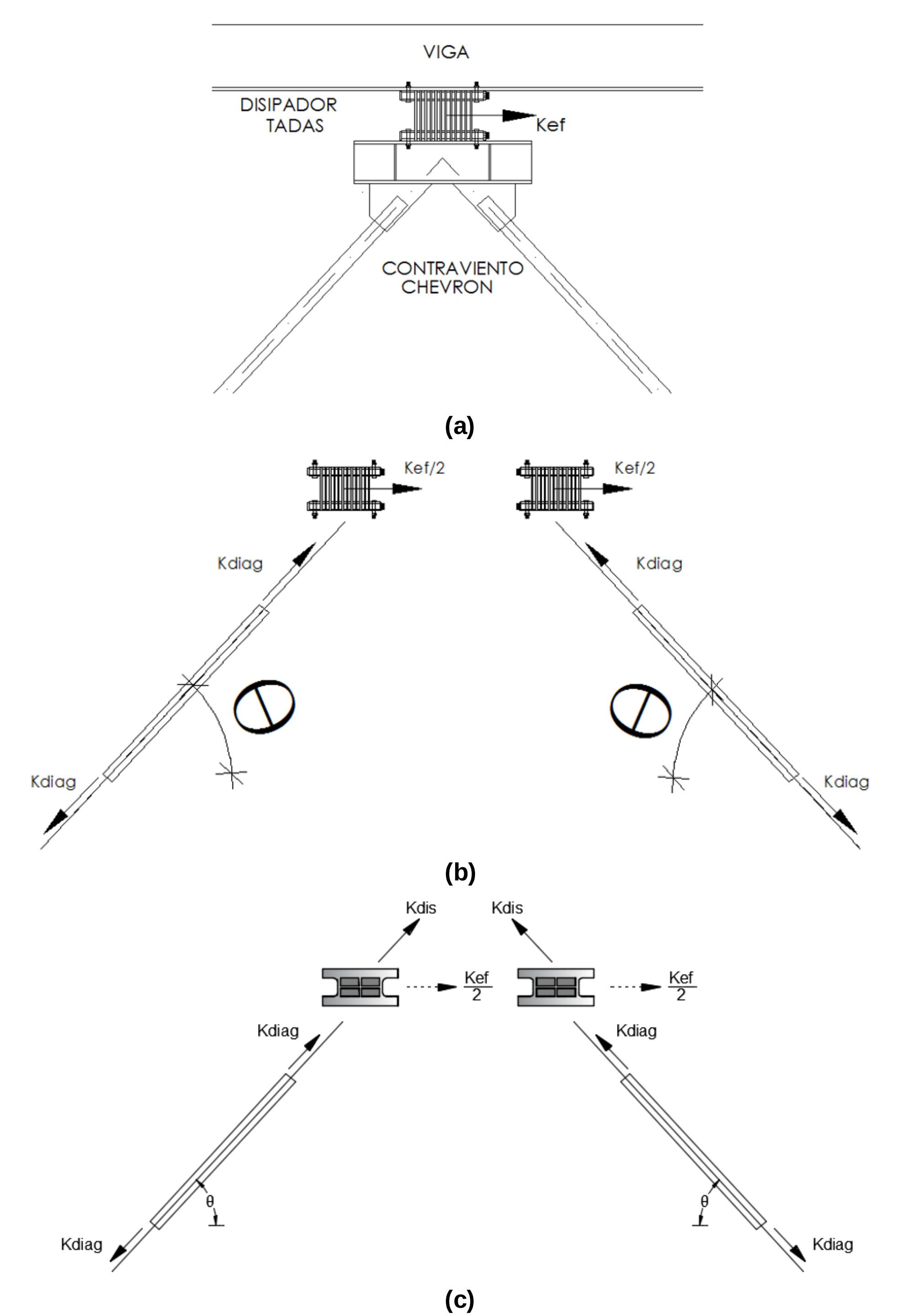


Figura 15 a) Rigidez efectiva del TADAS K_{ef} sobre contravientos de acero; b) Descomposición de K_{ef} y rigidez axial de cada diagonal; c) Rigideces en serie de la diagonal y del disipador TADAS

$$K_{diag} = \frac{E_s\,A}{L} \qquad (8)$$

$$T = \frac{1}{\cos\theta} \qquad (9)$$

$$K_{dis} = T^t\,K_{ef}\,T \qquad (10)$$

Donde T es la matriz de rotación de coordenadas de la componente horizontal del disipador a la componente axial del disipador. Finalmente al considerar que el disipador funciona debido al corrimiento relativo de piso, eso implica que la rigidez del disipador trabaje en serie con la rigidez de la diagonal, con lo que se tiene que la rigidez equivalente K_{eq}

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K_{diag}} + \frac{1}{K_{dis}} \qquad (11)$$

5. ANÁLISIS SÍSMICO PÓRTICO “A” CON DIAGONALES EN P.B. Y DISIPADORES TADAS

En este apartado se realiza el análisis sísmico del Pórtico A, en el cual se han colocado un disipador de 6 placas sobre contravientos en forma de V invertida en los pisos 2, 3 y 4 como se muestra en la figura 16. En la planta baja se tienen las diagonales de acero.

Las diagonales de los contravientos en que se apoya el TADAS es circular de 6’’ de diámetro interior y 11 mm, de espesor.

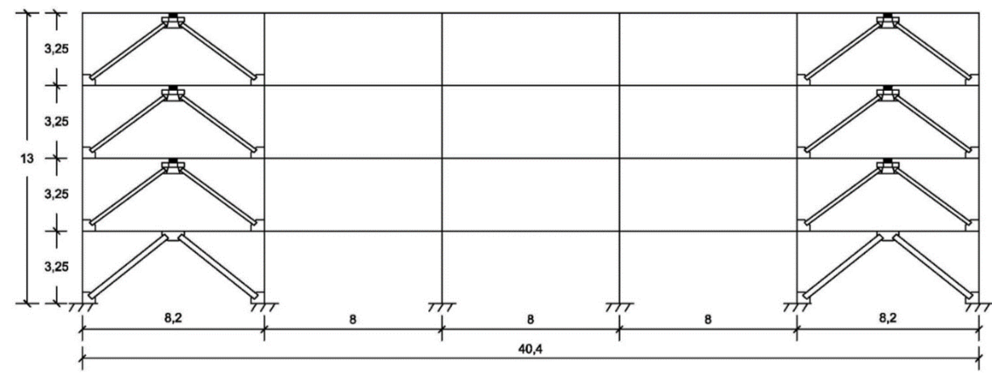


Figura 16 Pórtico A, con diagonales de acero en PB y disipadores TADAS sobre diagonales de acero en pisos 2, 3 y 4. Se coloca 1 disipador en cada contraviento.

Los desplazamientos relativos iniciales con los que se trabaja son los indicados en la Tabla 4. La geometría del disipador ha sido ya indicada, solo resta mostrar la geometría del vano en que se colocarán los disipadores, esto se ve en la figura 17. Por cierto ahí se han colocado dos disipadores TADAS en la figura 17, para el cálculo que se muestra a continuación se considera un solo disipador como se aprecia en la figura 16 pero después se cambia a dos en el segundo piso.

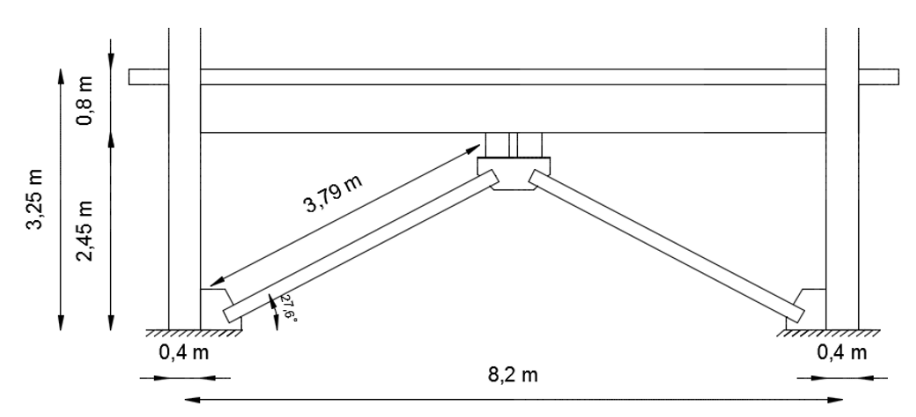


Figura 17 Geometría de un vano del Pórtico A, en que se tienen los disipadores TADAS sobre contravientos de acero redondos de 6'' y 11 mm, de espesor.

- **Análisis con un disipador en cada contraviento**

Para el caso de un solo disipador, sobre las diagonales circulares de 6'' de diámetro y 11 mm, de espesor; en la tabla 5 se indica el corrimiento relativo, la rigidez efectiva y la rigidez equivalente, para la condición inicial de cálculo.

Tabla 5 Rigidez efectiva de disipador TADAS y rigidez equivalente de conjunto diagonal-TADAS, para espectros DBE y MCE. Pórtico A con 1 solo disipador sobre las diagonales circulares de 6'' por 11 mm, de espesor

Piso	DBE			MCE		
	qr (cm)	Kef (t/m)	Keq (t/m)	qr (cm)	Kef (t/m)	Keq (t/m)
2	2.77	71640	2448.5	3.82	52290	2404.8
3	2.45	81460	2463.0	3.35	59310	2423.8
4	1.40	141790	2509.3	1.93	103350	2485.8

Se consideró un factor de amortiguamiento $\xi_{eq} = 0.12$, cantidad que es muy conservadora ya que 0.05 es el amortiguamiento intrínseco de la estructura. Los espectros indicados en la figura 4, son para $\xi = 0.05$. Para hallar un espectro asociado a un amortiguamiento $\xi_{eq} = 0.12$, se dividen estos espectros para el factor B, que permite obtener espectros para cualquier valor de amortiguamiento.

$$B = \left(\frac{\xi_{eq}}{0.05}\right)^{0.3} \tag{12}$$

En el análisis sísmico se debe tener en cuenta que la matriz de rigidez total KT, es igual a la contribución de la matriz de rigidez de los elementos de hormigón armado, más la contribución de los elementos de acero (diagonales de planta baja) y más la contribución de los elementos: diagonal-disipador.

Con la acotación indicada, el **período fundamental de vibración que se obtiene es 0.516 seg**. Los períodos anteriores son: 0.645 seg, para la estructura original; 0.53 seg, para la estructura solo con diagonales en la planta baja. De tal manera que se sigue rigidizando la estructura pero esta vez en menor cantidad. Los

desplazamientos laterales q; desplazamientos relativos q_r y derivas de piso que se encuentran se indican en la tabla 6 y en la figura 18.

Tabla 6 Desplazamientos q; desplazamientos relativos q_r, derivas de piso γ, ante espectros DBE y MCE, de estructura con diagonales en P.B, y disipadores de energía sobre contravientos de piso 2 a 4.

Piso	DBE			MCE		
	q (cm)	qr (cm)	γ $(\%)$	q (cm)	qr (cm)	γ $(\%)$
1	0.14	0.14	0.04	0.19	0.19	0.06
2	2.08	1.94	0.60	2.86	2.67	0.82
3	3.95	1.87	0.57	5.43	2.57	0.79
4	5.02	1.08	0.33	6.91	1.48	0.46

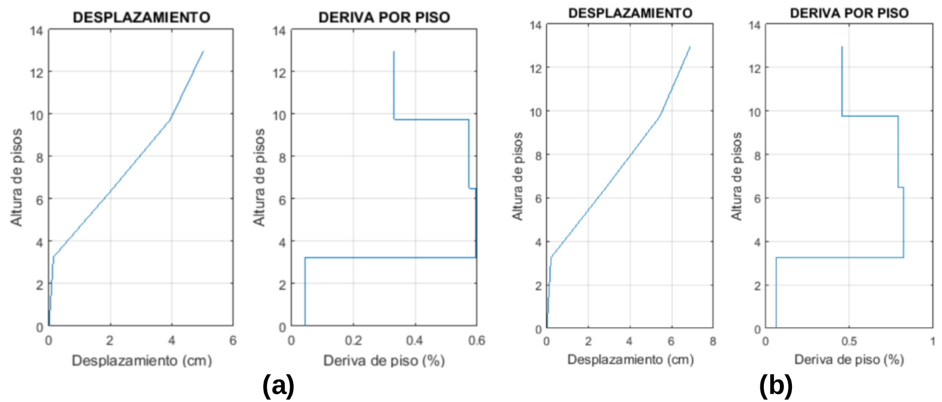


Figura 18 Desplazamientos y derivas de piso en Pórtico A, con diagonales de acero en P.B y un disipador TADAS sobre diagonales de acero en pisos 2 a 4.

- **Análisis con dos disipadores en 2do piso y 1 en Pisos 3 y 4**

La diferencia entre la figura 19 y la 16, es que en el segundo piso, se ha colocado dos disipadores de energía en el segundo piso y en los restantes se mantiene 1 disipador.

Para el cálculo de la rigidez efectiva en los disipadores del segundo piso se considera $n = 12$. En los restantes pisos (3 y 4) $n = 6$. Los desplazamientos relativos con que se inicia el cálculo son los indicados en la Tabla 6. Con esta acotación en la tabla 7 se presentan las nuevas rigideces efectivas K_{ef} y rigidez equivalente K_{eq}, con las cuales se obtiene la contribución a la matriz de rigidez de los elementos: diagonal-disipador; se recuerda que en la Planta Baja solo se colocaron diagonales de acero.

Por cierto, la matriz de rigidez se obtiene sumando la contribución de la matriz de rigidez de los elementos de hormigón más la contribución de los elementos de acero y más la contribución de los elementos: diagonal-disipador. Con esta matriz de rigidez se condensa al modelo de 4 grados de libertad.

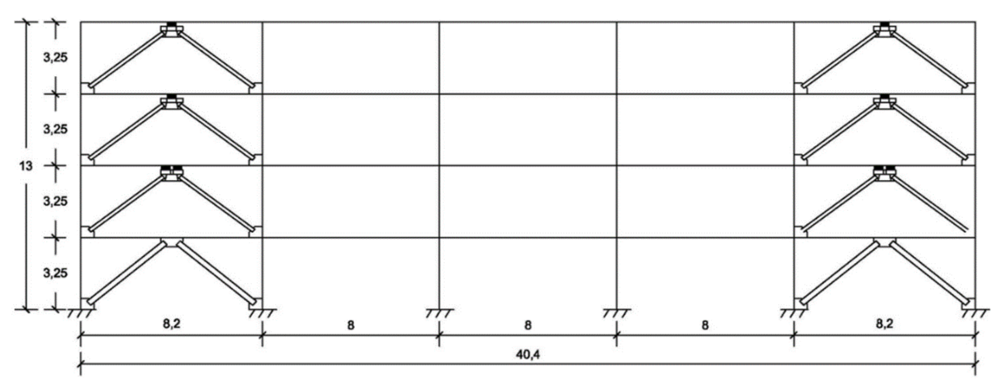


Figura 19 Pórtico A, con diagonales de acero en PB y disipadores TADAS sobre diagonales de acero en pisos 2, 3 y 4. Se coloca 2 disipadores en cada contraviento del Piso 2 y 1 disipador en cada contraviento en pisos 3 y 4.

Tabla 7 Rigidez efectiva de disipador TADAS y rigidez equivalente de conjunto diagonal-TADAS, para espectros DBE y MCE. Pórtico A con solo diagonales de acero en piso 1; 2 TADAS sobre cada contraviento de 2do piso y 1 TADAS sobre cada contraviento de piso 3 y 4.

Piso	DBE			MCE		
	qr (cm)	Kef (t/m)	Keq (t/m)	qr (cm)	Kef (t/m)	Keq (t/m)
2	1.94	205190	2529.1	2.67	149500	2512.6
3	1.87	106640	2488.5	2.57	77530	2457.6
4	1.08	184330	2524.1	1.48	134160	2505.7

Los resultados del análisis sísmico para cuando se tienen 2 disipadores TADAS sobre los contravientos del segundo piso y un disipador TADAS sobre los contravientos del 3ero y 4to piso se indican en la tabla 8.

Los desplazamientos relativos de la tabla 7 (valores iniciales con los que se obtuvo la rigidez efectiva y rigidez equivalente) son parecidos a los valores relativos de la tabla 8 valores al final del análisis sísmico). Son parecidos por lo que se decide dar por finalizado el análisis plano.

Tabla 8 Desplazamientos q; desplazamientos relativos q_r, derivas de piso γ, ante espectros DBE y MCE, de estructura con diagonales en P.B, 2 disipadores TADAS sobre cada contraviento de 2do piso y 1 TADAS sobre contraviento de 3 y 4 piso.

Piso	DBE			MCE		
	q (cm)	qr (cm)	γ $(\%)$	q (cm)	qr (cm)	γ $(\%)$
1	0.14	0.14	0.043	0.19	0.19	0.0586
2	2.03	1.89	0.581	2.78	2.59	0.7976
3	3.85	1.82	0.560	5.29	2.50	0.7706
4	4.90	1.05	0.323	6.73	1.44	0.4445

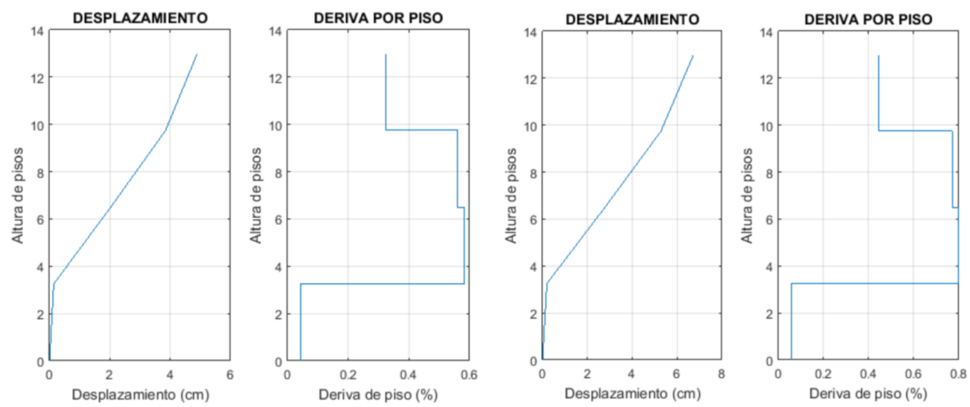


Figura 20 Desplazamientos y derivas de piso en Pórtico A, con diagonales de acero en P.B y dos disipadores TADAS sobre cada uno de los contravientos del segundo piso y un disipador TADAS sobre los contravientos de 3 y 4 piso.

En la figura 20 se presenta los desplazamientos y derivas de piso de la estructura reforzada. Ante el espectro MCE, que es un gran terremoto las derivas de piso esperadas están alrededor del 0.8%; cantidad aceptable, pero implica daño.

6. ANÁLISIS ESTÁTICO DE PÓRTICO A

El objetivo del presente apartado es ilustrar el cálculo estático del Pórtico A, sometido a carga vertical y carga lateral. Pero antes se debe indicar que del análisis sísmico se obtuvieron las siguientes fuerzas laterales en el Pórtico A.

$$F = [4.156\ T \qquad 10.554\ T \qquad 17.106\ T \qquad 24.914\ T]$$

Las mismas que actúan en los nudos 7, 18, 29 y 40 (ver figura 6 b). Estas fuerzas se hallaron considerando un valor de reducción de las fuerzas sísmicas de $R = 4$. Por otra parte, se obtuvo con el Espectro de Diseño DBE, hallado en el estudio de peligrosidad sísmica.

Para encontrar el espectro inelástico, no se trabajó con una ecuación de reducción de las fuerzas sísmicas, que involucre al valor de R indicado y al factor de amortiguamiento, debido a la presencia de los disipadores TADAS.

El espectro inelástico se obtuvo dividiendo primero el espectro elástico por B (ecuación 12) y después dividiendo para $R = 4$. De esta forma se hallaron las fuerzas laterales indicadas. Se trabajo con un $\xi_{eq} = 0.13$

Ahora bien para las cargas verticales se trabaja con $D = 1.008\ {}^{T}\!/_{m^2}$. Una carga viva $L = 0.25\ {}^{T}\!/_{m^2}$ por el cambio de uso de la estructura, que pasará a ser oficinas. El estado de carga considerado es $1.2\ D + L + S$. Se recuerda que el ancho cooperante es 5.5/ 2. Con esto se tiene una carga uniforme distribuida de $P_o = 4.01\ \frac{T}{m}$. En la figura 21 se muestra el estado de cargas a resolver.

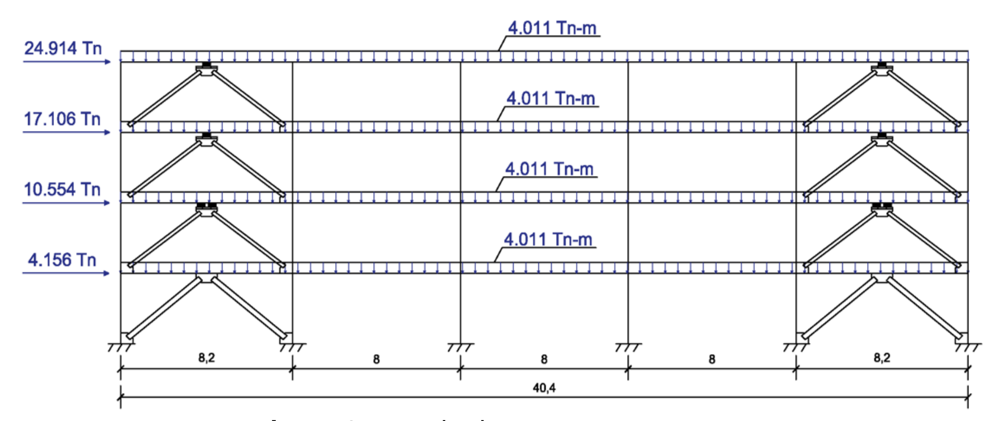


Figura 21 Estado de cargas $1.2\,D + L + S$

La matriz de rigidez de la estructura KT es igual a la matriz de rigidez de los elementos de hormigón armado (columnas de 40/55 cm, y vigas de 40/80 cm) más la contribución de las diagonales de acero del primer piso (perfiles tubulares de 250/250/18 mm) más la contribución del conjunto diagonal-disipador.

Las diagonales que conforman los contravientos que sostienen al disipador son de 6'' por 11 mm, de espesor. Por otro lado, en el segundo piso se colocaron dos disipadores TADAS sobre cada contraviento y en el tercer y cuarto piso un TADAS.

La matriz de rigidez de los elementos diagonales en coordenadas globales, con la que se trabajó, es la siguiente. Aguiar (2014)

$$\boldsymbol{K}_3 = \frac{E_s\,A}{L}\begin{bmatrix} cos_\theta^2 & sen_\theta\,cos_\theta & 0 & -cos_\theta^2 & -sen_\theta\,cos_\theta & 0 \\ sen_\theta\,cos_\theta & sen_\theta^2 & 0 & -sen_\theta\,cos_\theta & -sen_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -cos_\theta^2 & -sen_\theta\,cos_\theta & 0 & cos_\theta^2 & sen_\theta\,cos_\theta & 0 \\ -sen_\theta\,cos_\theta & -sen_\theta^2 & 0 & sen_\theta\,cos_\theta & sen_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Donde E_s es el módulo de elasticidad del acero; A es el área de la sección transversal; L es la longitud de la diagonal; θ es el ángulo que forma la diagonal con el eje horizontal. Para el elemento "diagonal equivalente" que contiene a la diagonal y al disipador, la matriz de rigidez del elemento en coordenadas globales, es:

$$\boldsymbol{K}_3 = K_{eq}\begin{bmatrix} cos_\theta^2 & sen_\theta\,cos_\theta & 0 & -cos_\theta^2 & -sen_\theta\,cos_\theta & 0 \\ sen_\theta\,cos_\theta & sen_\theta^2 & 0 & -sen_\theta\,cos_\theta & -sen_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -cos_\theta^2 & -sen_\theta\,cos_\theta & 0 & cos_\theta^2 & sen_\theta\,cos_\theta & 0 \\ -sen_\theta\,cos_\theta & -sen_\theta^2 & 0 & sen_\theta\,cos_\theta & sen_\theta^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Donde K_{eq} es la rigidez equivalente del conjunto diagonal-disipador que fue obtenida con los desplazamientos relativos del estado de carga sísmico.

Se ha trabajado con matrices de rigidez en coordenadas globales $\boldsymbol{K}_3$ de seis por seis, debido a que se está trabajando con vectores de colocación que tienen seis elementos, para ello en la $\boldsymbol{K}_3$ se ha colocado ceros en la tercera y sexta columna, lo propio se ha hecho en la tercera y sexta fila (artificio para poder trabajar con vectores de colocación de seis cantidades)

Interesa solo ver las fuerzas a las que se encuentran trabajando las diagonales del Pórtico A. Estas se presentan en la tabla 9, las cuatro primeras filas corresponden al caso en que se tiene solo diagonales en el piso 1, las siguientes corresponden al conjunto diagonal-disipador. Evidentemente que cuando solo existe diagonal en el pórtico se tiene las mayores fuerzas axiales.

Tabla 9 Fuerzas en diagonales de piso 1 y diagonal equivalente de pisos 2 a 4. Debidos a estados de carga vertical más menor sismo.

Elemento	Número	1.2 D + L +S (T.)	1.2 D + L –S (T.)
Diagonal	65	-4.48	17.81
	66	18.51	-6.10
	67	-5.46	17.51
	68	16.89	-3.54
Diagonal Equivalente	69	-4.64	11.18
	70	15.26	-7.82
	71	-7.16	13.65
	72	13.98	-4.65
	73	-4.53	12.91
	74	12.60	-6.80
	75	-6.38	12.01
	76	12.61	-4.15
	77	-0.42	9.76
	78	9.44	2.52
	79	-2.01	8.92
	80	9.74	-0.35

7. ANÁLISIS DE PÓRTICO 1

La carga muerta de la estructura reforzada es: $D = 1.008\ T/_{m^2}$, la carga viva $L = 0.25\ T/_{m^2}$, para el nuevo uso que tendrá la edificación de oficinas administrativas. Nuevamente para el análisis se considera $D + 0.25\ L = 1.071\ T/_{m^2}$ Al multiplicar esta cantidad por el ancho cooperante de 4.1 m, se tiene que la carga uniforme repartida vale: 4.39 T/m.

En la figura 22 se muestra la geometría del Pórtico 1 y la carga vertical actuante correspondiente a $D + 0.25\ L$ (En la figura 21 la carga vertical corresponde al estado $1.2\ D + L$) Nótese que todas las columnas exteriores son de 40/55 cm, y las vigas de 40/80 cm (Diseñada originalmente con criterio de viga fuerte-columna débil). Los elementos inclinados corresponden a la rampa del Ex Parqueadero que a futuro pasarán a ser Auditorios.

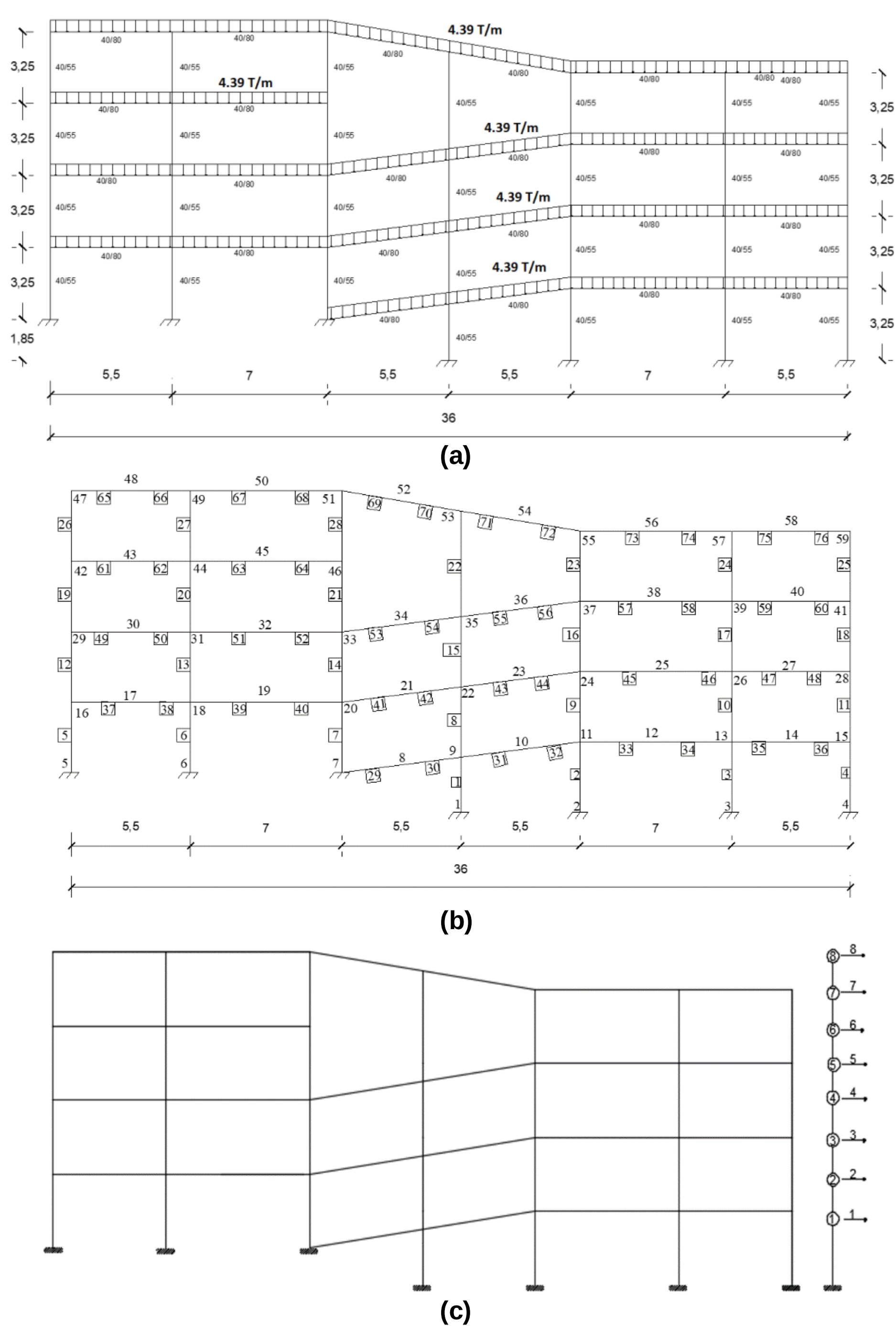


Figura 22 a) Geometría de Pórtico 1, en sentido transversal y carga uniforme para nueva condición de uso: Edificio Administrativo; b) Numeración de nudos y elementos; c) Modelo Numérico de cálculo de 8 grados de libertad.

En la figura 22 b, se aprecia la numeración de nudos y elementos, donde se ha considerado nudo en la mitad de la viga. Finalmente, en la figura 22 c, se muestra

el modelo numérico de análisis sísmico. La estructura es de 4 pisos pero tiene losas a diferentes desniveles por lo que se trabaja con un modelo de 8 grados de libertad. Los grados de libertad pares tienen como área cooperante para la matriz de masas a las losas de los niveles 5.10 (37 a 40); 8.35 (49 a 52); 11.60 (61 a 64) y 14.85 m (65 a 68) Entre paréntesis se indica el número de los elementos. Para el grado de libertad 1, los elementos que aportan a la matriz de masas son: 29 a 36. Para el grado de libertad 3, los elementos son 41 a 48. Para el 5, los elementos van del 53 al 60 y para el grado de libertad 7 van del 69 al 76.

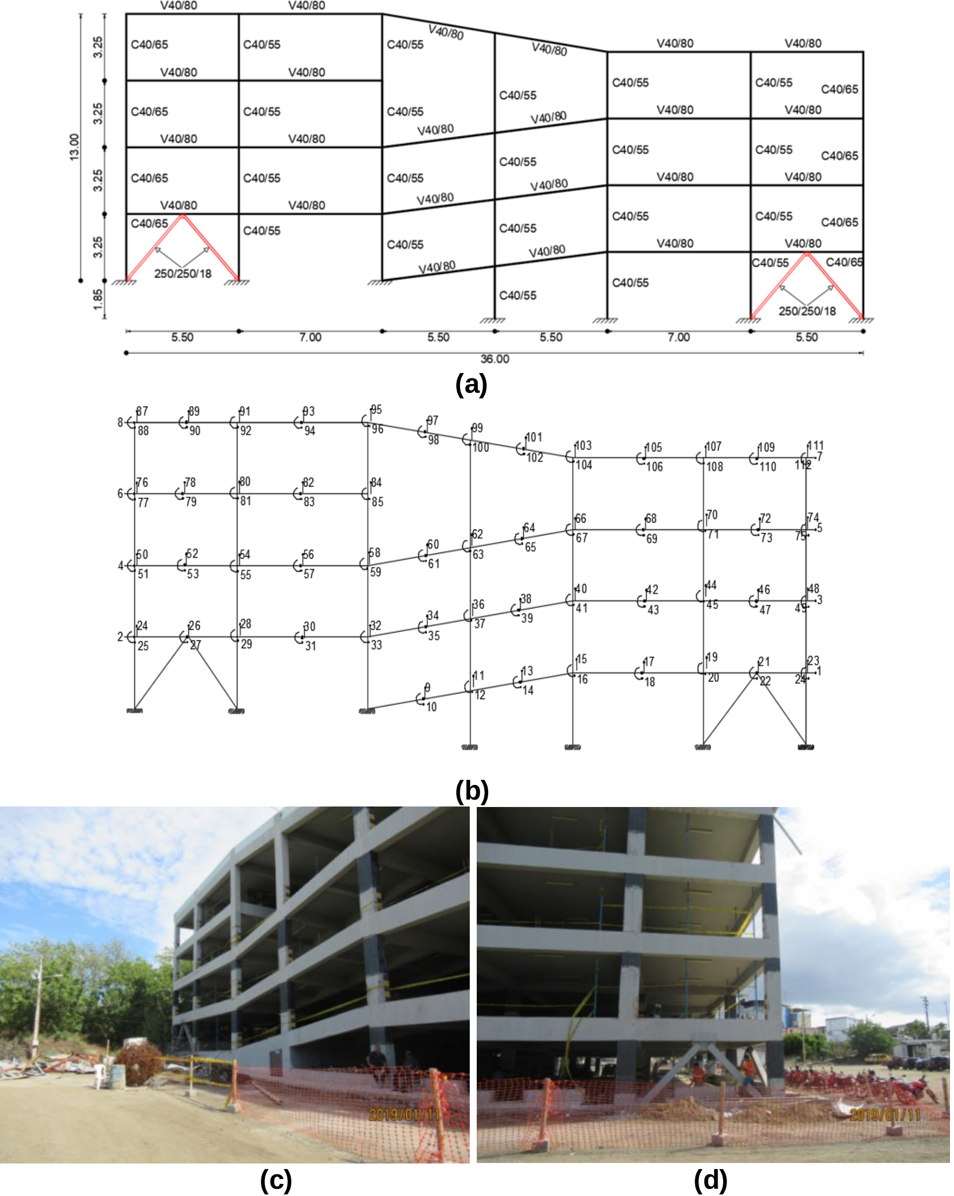


Figura 23 Pórtico 1 solo con diagonales en Piso 1; a) Modelo de cálculo; b) Grados de libertad; c) Vista de diagonal en lado izquierdo; d) Vista de diagonal en lado derecho

- **Pórtico 1 sin diagonales y con diagonales en Piso 1**

Se presenta los resultados del análisis sísmico del Pórtico 1, ante el espectro MCE, para dos condiciones, la primera sin ninguna diagonal en el Pórtico y la segunda colocando los diagonales que se indican en la figura 23. Las diagonales de acero tienen las mismas dimensiones que en el Pórtico A, es decir, de 250/250/18 mm. Los resultados en términos de desplazamientos laterales y derivas de piso se muestran en la figura 24 y en forma numérica en la tabla 10

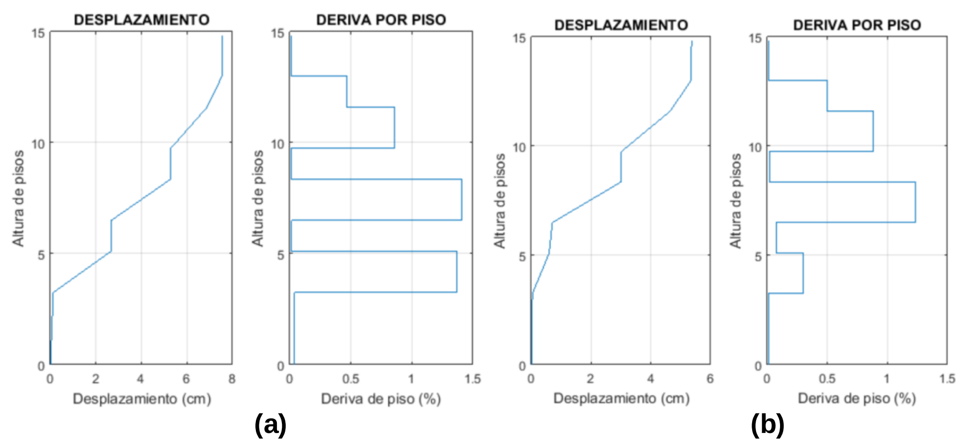


Figura 24 Respuesta en desplazamientos y derivas de piso de Pórtico 1 ante espectro MCE; a) Estructura solo sin diagonales; b) Estructura solo con diagonales en Piso 1.

Tabla 10 Desplazamientos, derivas de piso y desplazamientos relativos de Pórtico 1 ante espectro MCE en Pórtico sin y con diagonales en Primer Piso.

Grado De Libertad	**Estructura sin diagonales**			**Diagonales solo en 1er Piso**		
	q (cm)	γ (%)	q_r (cm)	q (cm)	γ (%)	q_r (cm)
1	0.13	0.0389	0.13	0.04	0.0109	0.04
2	2.66	1.3670	2.53	0.60	0.3027	0.56
3	2.68	0.0152	0.02	0.70	0.0757	0.11
4	5.28	1.4059	2.60	2.99	1.2356	2.29
5	5.30	0.0140	0.02	3.01	0.0173	0.02
6	6.89	0.8596	1.59	4.65	0.8841	1.64
7	7.54	0.4687	0.66	5.34	0.4963	0.69
8	7.56	0.0097	0.02	5.36	0.0108	0.02

- **Pórtico 1 con un TADAS en Pisos 2 a 4 y con 2 TADAS en Piso 2**

En los dos casos que se analizan, en el Piso 1, se tiene diagonales de acero cuadradas de 250/250/18 mm. Ahora del piso 2 al 4 se colocaron contravientos circulares de 6'' por 11 mm, de espesor.

Con esta introducción, se debe indicar que se tienen dos casos, el primero de ellos se colocan 1 disipador TADAS sobre los contravientos de los pisos 2 a 4,

ver figura 25 a. En el segundo caso se colocan 2 disipadores TADAS en el piso 2 y 1 TADAS en los pisos 3 y 4, como se aprecia en la figura 25 b.

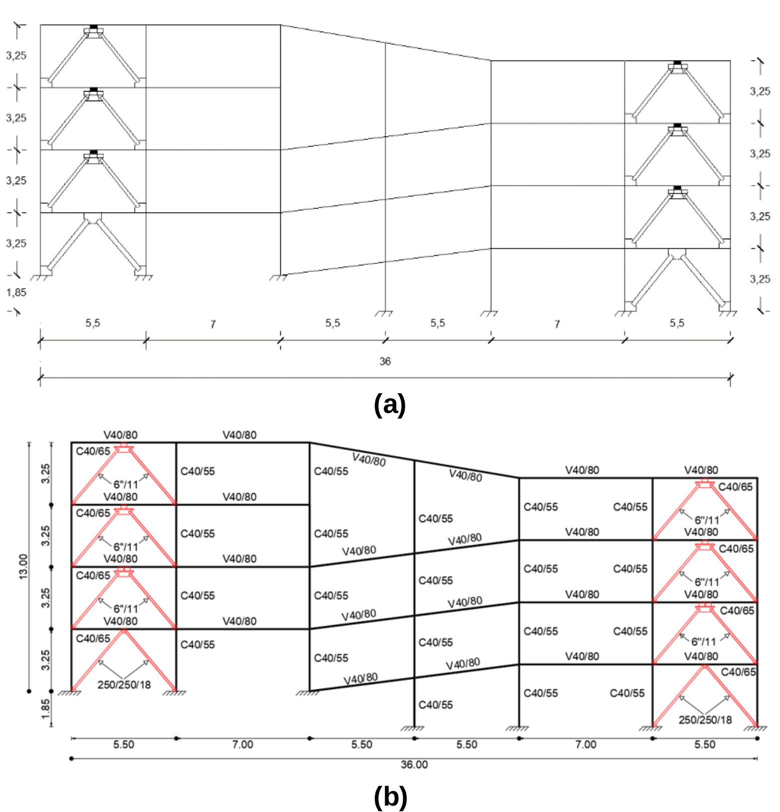


Figura 25 Pórtico 1 con diagonales en Piso 1; a) Con un disipador TADAS de piso 2 a 4; b) Con 2 TADAS en piso 2 y 1 TADAS en Pisos 3 y 4

Tabla 11 Desplazamientos, derivas de piso y desplazamientos relativos de Pórtico 1 ante espectro MCE en Pórtico con 1, con diagonales en Piso 1 y TADAS en pisos 2 a 4 y con 2 TADAS en piso 2 y 1 TADAS en Pisos 3 a 4.

Grado De Libertad	**Estructura sin diagonales**			**Diagonales solo en 1er Piso**		
	q (cm)	γ (%)	q_r (cm)	q (cm)	γ (%)	q_r (cm)
1	0.03	0.0085	0.03	0.03	0.0083	0.03
2	0.45	0.2304	0.43	0.44	0.2246	0.42
3	0.53	0.0543	0.08	0.52	0.0529	0.07
4	2.20	0.9004	1.67	2.14	0.8785	1.63
5	2.22	0.0169	0.02	2.16	0.0165	0.02
6	3.48	0.6790	1.26	3.39	0.6631	1.23
7	4.02	0.3920	0.55	3.93	0.3843	0.54
8	4.04	0.0083	0.02	3.94	0.0081	0.01

Para el primer caso (1 TADAS de piso 2 a 4) se calculó con un factor de amortiguamiento equivalente de $\xi_{eq} = 0.12$. Para el segundo caso en que en el segundo piso se tienen 2 disipadores TADAS y en los restantes uno se analizó con

un $\xi_{eq} = 0.13$. Los resultados se presentan en la tabla 11 y en forma gráfica en la figura 26

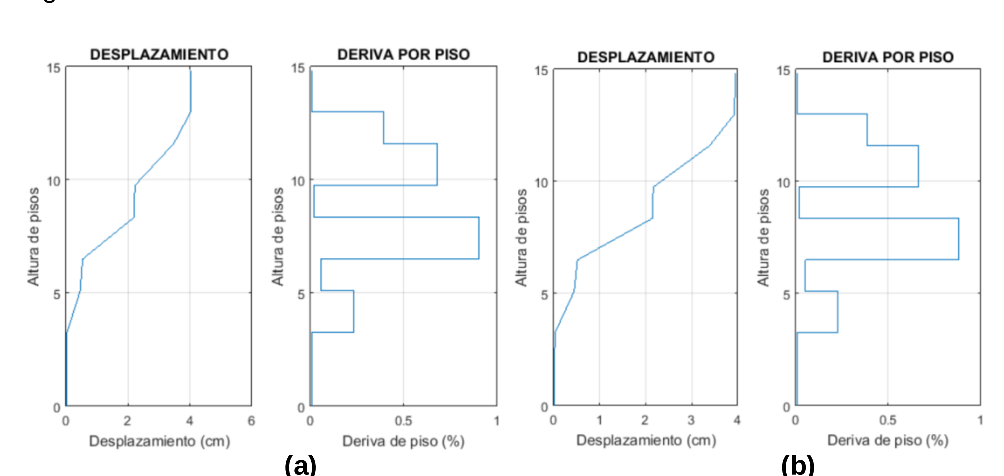


Figura 26 Respuestas en desplazamientos y derivas de piso en Pórtico 1, con diagonales cuadradas tubulares en Piso 1 y con diagonales; ante espectro MCE; a) En Pisos 2 a 4 tiene un disipador TADAS sobre contravientos circulares; b) en Piso 2 tiene 2 TADAS y en pisos 3 y 4, se tiene 1 TADAS

- **Fuerzas estáticas equivalentes**

El espectro elástico se dividió en primer lugar para B, que considera un factor de amortiguamiento equivalente $\xi_{eq} = 0.13$ y después para un factor de reducción de las fuerzas sísmicas $R = 4$. Con estas acotaciones se halló las fuerzas estáticas equivalentes, aplicando el criterio de combinación modal CQC, con lo que se obtuvo las fuerzas laterales indicadas a continuación, para el espectro DBE.

$$F^t = [1.842 \quad 2.473 \quad 3.507 \quad 6.873 \quad 11.046 \quad 8.215 \quad 24.868 \quad 13.246]$$

- **Estado de cargas $\mathbf{1.2\,D + L \mp S}$**

En la figura 27, la carga uniforme distribuida corresponde al estado de cargas: $1.2\,D + L$, y las fuerzas laterales indicadas al estado $+S$. Para la determinación de la rigidez efectiva de los disipadores se trabajó con los desplazamientos relativos indiados en la última columna de la tabla 11.

En la tabla 12 se muestran las fuerzas en las diagonales del Primer Piso y en las diagonales equivalentes de los Pisos 2 a 4.

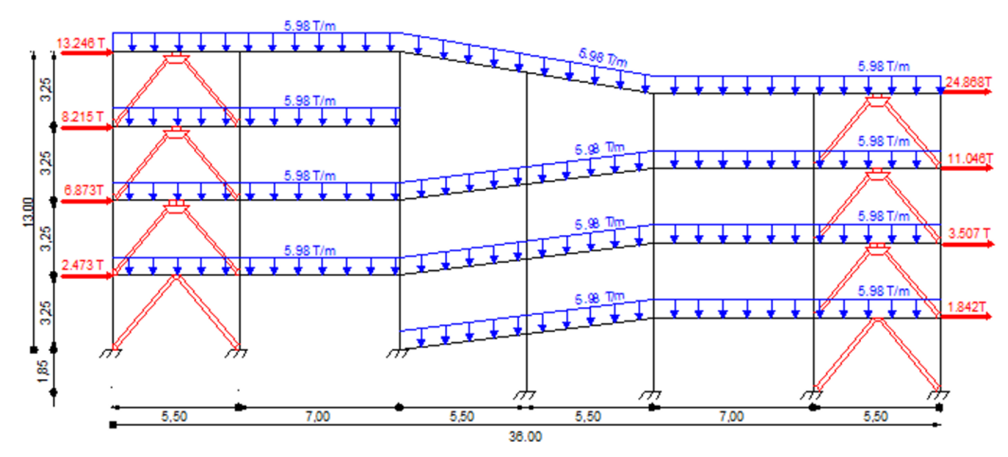


Figura 27 Estado de cargas estáticas $1.2\,D + L + S$. En Pórtico 1

Tabla 12 Fuerzas en diagonales de piso 1 y diagonal equivalente de pisos 2 a 4. Debidos a estados de carga vertical más menor sismo.

Elemento	Número	1.2 D + L +S (T.)	1.2 D + L –S (T.)
Diagonal	77	-7.94	19.04
	78	19.64	-9.47
	79	2.06	7.08
	80	8.12	3.68
Diagonal Equivalente	81	-3.56	9.43
	82	10.50	-6.21
	83	-3.78	7.73
	84	8.56	-1.53
	85	-1.33	8.47
	86	6.22	-4.58
	87	-6.70	8.47
	88	10.28	-3.11
	89	1.26	5.95
	90	3.44	-2.03
	91	-6.49	8.60
	92	9.73	-3.36

8. DISEÑO DE PLACA GUSSET

En la tabla 9 se ha presentado las fuerzas que actúan en las diagonales del Pórtico A y en la tabla 12 lo propio pero en el Pórtico 1. En los dos casos la fuerza que transmiten las diagonales del primer piso, están alrededor de las 20 T; esta cantidad es la **demanda**.

En este apartado se obtiene la **capacidad** de la placa a: i) Tensión; ii) Cortante Vertical; iii) Resistencia del Bloque de cortante al desgarramiento; iv) Resistencia a la compresión; v) Soldadura de los elementos. Kotulka (2007); Aguiar *et al.* (2016 2, 3).

Evidentemente que la capacidad tiene que ser mayor que la demanda. En este apartado primero se indica los tipos de placa que se utilizaron en el reforzamiento, en la figura 28 a, y b. Se debe indicar que la dimensión de la placa más tiene que ver con la geometría del vano del pórtico en el sentido de que la diagonal pueda introducirse 15 cm, en la placa Gusset y que la distancia L2 (ver figura 28 c, sea otros 15 cm. Del Castillo (2018)

Los 15 cm, que la diagonal van incrustadas por la mitad en la Placa Gusset van soldadas en las dos caras. El espesor de la placa es de 1.5 cm. Las placas que más se emplearon es la indicada en la figura 28 b, que tiene LH=45 cm (dimensión horizontal de apoyo) LV=35 cm (dimensión vertical), ver gráfico de figura 28 c. Por cierto el ángulo θ corresponde al vano de 5.50 m.

En cada una de las gráficas de la figura 29, se presenta el cálculo de la Capacidad de la Placa Gusset; en ellas se aprecia las ecuaciones de cálculo y los resultados obtenidos se aprecia que en todos los casos, la capacidad es mayor que la demanda y se tiene un buen factor de seguridad.

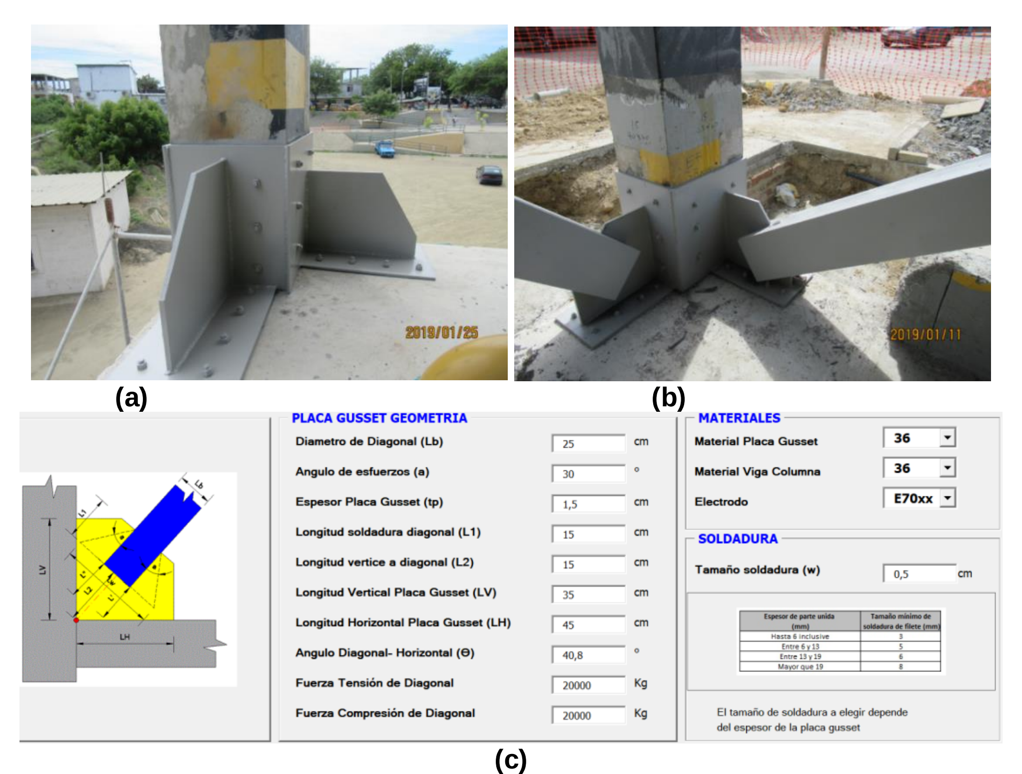
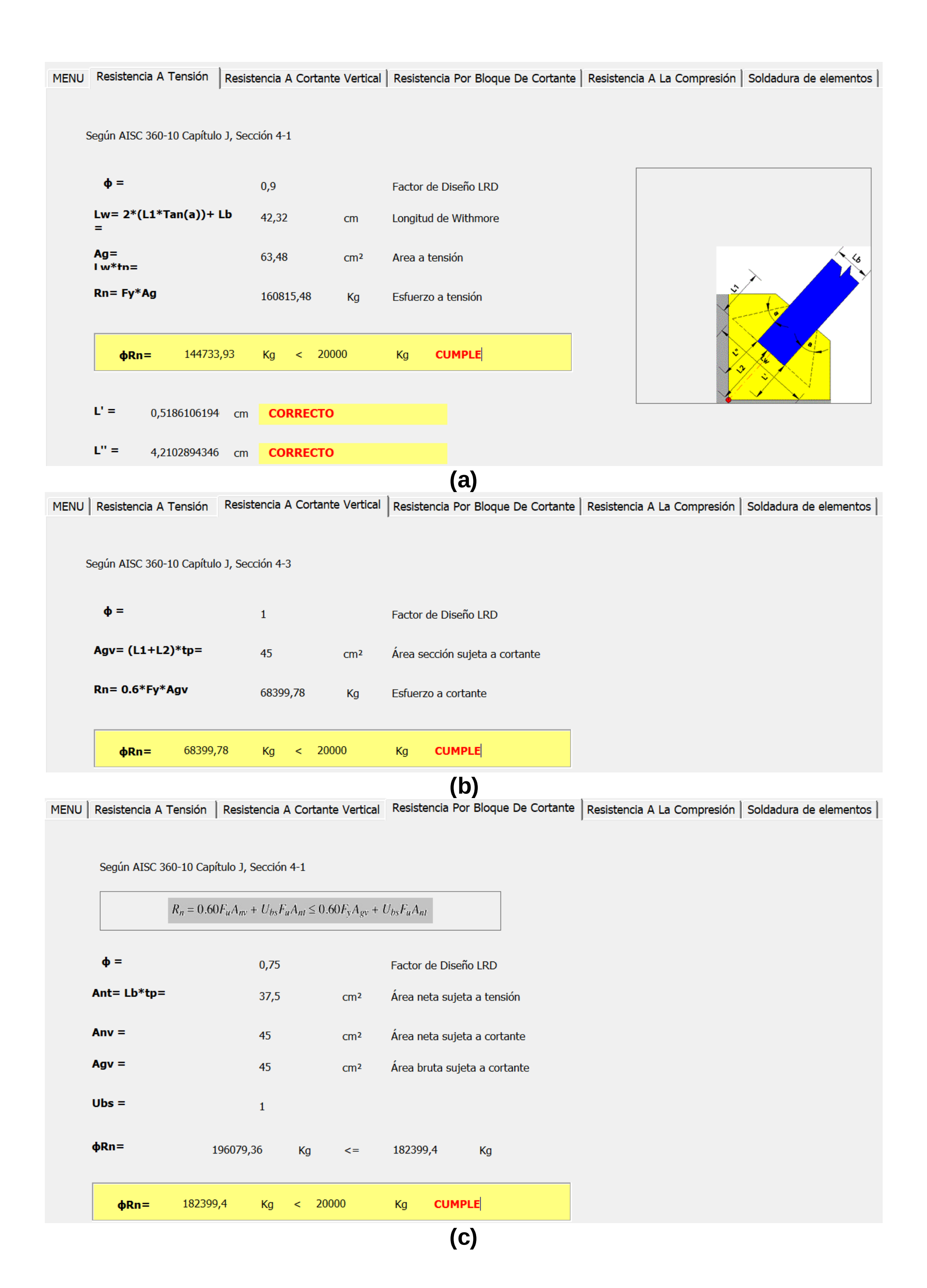


Figura 28 Placas Gusset utilizadas en el reforzamiento del parqueadero; a) Placas para vano de luz 5.5 m (más grande) y de 8.20 m; b) Placas cuyas dimensiones están indicadas en gráfica inferior; c) Datos de entrada para utilizar programa en EXCEL que halla la capacidad de placas Gusset. Aguiar *et al.* (2016).


MENU | Resistencia A Tensión | Resistencia A Cortante Vertical | Resistencia Por Bloque De Cortante | Resistencia A La Compresión | Soldadura de elementos
Según AISC 360-10 Capítulo J, Sección 4-1
ϕ = 0,9 Factor de Diseño LRD
Lw= 2*(L1*Tan(a))+ Lb = 42,32 cm Longitud de Withmore
Ag= Lw*tp= 63,48 cm² Area a tensión
Rn= Fy*Ag 160815,48 Kg Esfuerzo a tensión
ϕRn= 144733,93 Kg < 20000 Kg CUMPLE
L' = 0,5186106194 cm CORRECTO
L'' = 4,2102894346 cm CORRECTO
(a)
MENU | Resistencia A Tensión | Resistencia A Cortante Vertical | Resistencia Por Bloque De Cortante | Resistencia A La Compresión | Soldadura de elementos
Según AISC 360-10 Capítulo J, Sección 4-3
ϕ = 1 Factor de Diseño LRD
Agv= (L1+L2)*tp= 45 cm² Área sección sujeta a cortante
Rn= 0.6*Fy*Agv 68399,78 Kg Esfuerzo a cortante
ϕRn= 68399,78 Kg < 20000 Kg CUMPLE
(b)
MENU | Resistencia A Tensión | Resistencia A Cortante Vertical | Resistencia Por Bloque De Cortante | Resistencia A La Compresión | Soldadura de elementos
Según AISC 360-10 Capítulo J, Sección 4-1
$R_n = 0.60F_uA_{nv} + U_{bs}F_uA_{nt} \leq 0.60F_yA_{gv} + U_{bs}F_uA_{nt}$
ϕ = 0,75 Factor de Diseño LRD
Ant= Lb*tp= 37,5 cm² Área neta sujeta a tensión
Anv = 45 cm² Área neta sujeta a cortante
Agv = 45 cm² Área bruta sujeta a cortante
Ubs = 1
ϕRn= 196079,36 Kg <= 182399,4 Kg
ϕRn= 182399,4 Kg < 20000 Kg CUMPLE
(c)

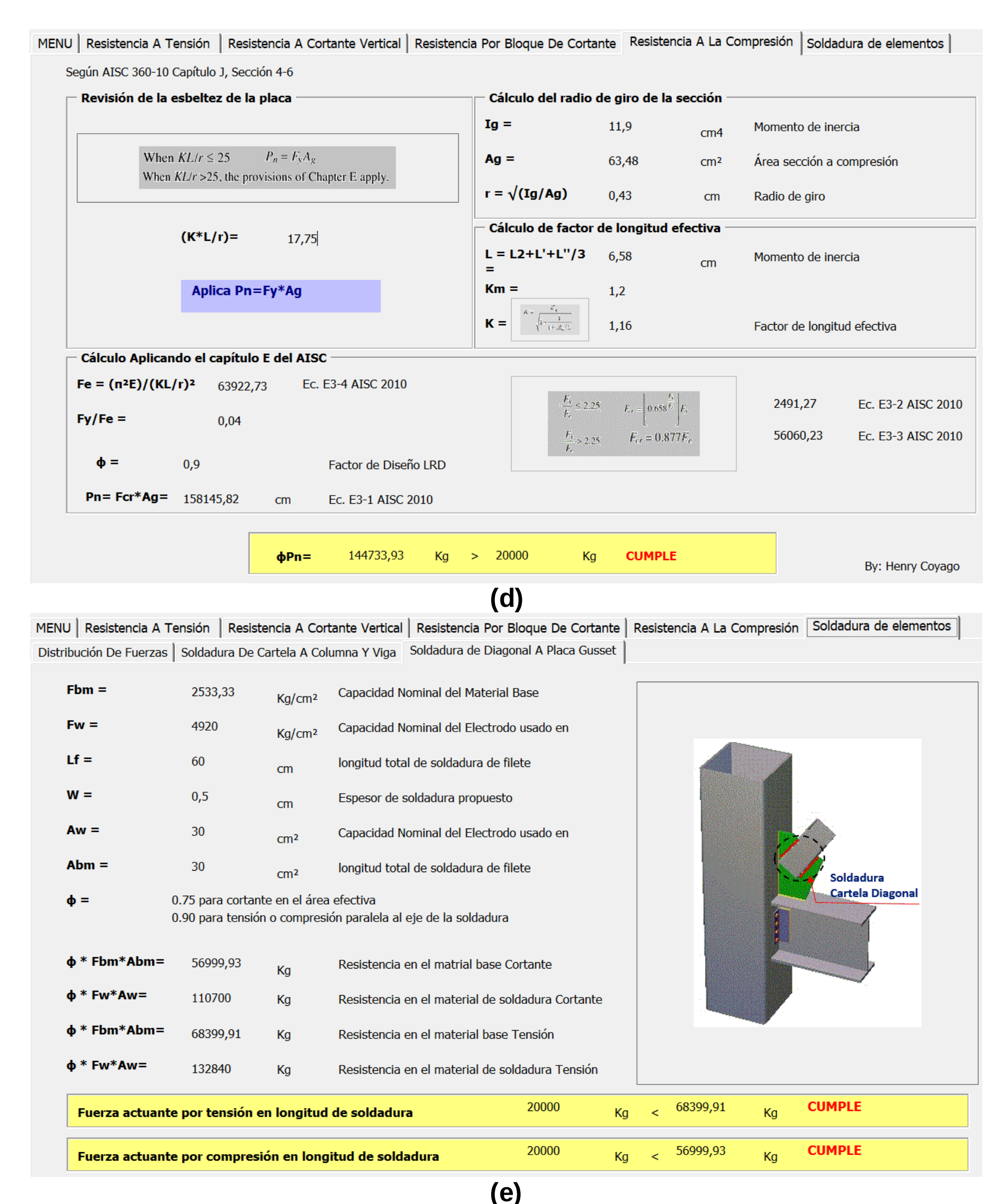


Figura 29 Capacidad de Placa Gusset; a) Tensión; b) Cortante Vertical; c) Resistencia del Bloque de Cortante; d) Resistencia a la compresión; e) Soldadura.

9. FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE

Se ha dejado para el último apartado, para hablar sobre el factor de amortiguamiento equivalente utilizado ξ_{eq} y el factor de reducción de las fuerzas sísmicas R; son dos factores con los cuales se pasa del espectro elástico al inelástico.

En el análisis estructural realizado para la determinación de las fuerzas en los elementos estructurales se trabajó con un factor de $R = 4$ y $\xi_{eq} = 0.13$.

Para la determinación de los desplazamientos y derivas de piso, únicamente se redujo el espectro por $\xi_{eq} = 0.13$. Al reemplazar este valor en la ecuación (12) en que se halla el valor de B se obtiene que $B = 1.33$, que es el valor máximo recomendado por la Norma de Chile de disipación de energía de 2017, para estructuras clasificadas como Categoría 1.

Realmente es muy conservador el valor de B máximo y por ende el factor de amortiguamiento equivalente $\xi_{eq} = 0.13$. Estrictamente la estructura analizada no clasifica como Categoria 1 ya que no tiene disipadores de energía en todos los pisos, clasificaría como Categoría 2. Pero se considera Categoría 1, debido a que en el piso 1, se colocó solo diagonales de acero; en el piso 2 se colocó 16 disipadores; en el piso 3 se colocó 8 y en el piso 4, se colocó 8. En total 32 disipadores de energía TADAS.

Los disipadores van entre columnas y vigas, no tienen excentricidades, se ha verificado su desempeño en laboratorio para dos disipadores. Por todo esto se consideró apropiado reducir el espectro elástico para el valor máximo de $B = 1.33$ Destacando que se considera conservador este valor si se toma en cuenta que el factor de amortiguamiento de cada disipador para el rango de desplazamientos relativos está entre 0.40 y 0.48.

El factor $R = 4$ utilizado tiene la siguiente explicación; en el diseño original la estructura no fue diseñada de acuerdo a los requerimientos del ACI 318, un ejemplo de ello es la falta de armadura de confinamiento en las columnas; otro que se diseñó con criterio de viga fuerte-columna débil. La estructura tiene redundancia ya que se cuenta con 6 ejes de columnas en sentido longitudinal y 7 en sentido transversal; esto es positivo.

Si tiene sobre resistencia, la resistencia de los hormigones utilizados en el reforzamiento supera el promedio los 30 MPa. Se está analizando con 24 MPa. Pero a más de ello sus elementos de acero le están confiriendo mayor rigidez. Una prueba más de que la estructura tiene sobre resistencia se tiene en los valores de capacidad presentados para la placa Gusset, que son mayores a la demanda.

Para el cálculo de las fuerzas el espectro de diseño DBE se dividió en primer lugar para B y posteriormente para R. No se utilizó una sola ecuación que tiene inmersos estos dos factores.

Al trabajar con $R = 4$ se espera algún daño menor en los elementos estructurales. No se puede pensar que una estructura que ha sido muy afectada durante el terremoto de 2016, no tenga ningún daño a futuro debido a que ha sido reforzada. Esto no se cumple debido a que la estructura original fue diseñada pensando en que la disipación de energía se va a dar en la estructura (con un valor de R alto).

En la estructura reforzada la mayor cantidad de energía disipada se dará en los disipadores de energía pero también en algunos elementos estructurales.

10. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

El objetivo principal de este artículo era ilustrar, con cierto detalle cómo se realiza el análisis sísmico en estructuras con disipadores de energía TADAS, razón por la cual se decidió presentar un análisis sísmico plano.

En el diseño se hizo un análisis modal espectral considerando tres grados de libertad por planta, dos componentes de desplazamiento y una rotación de piso, pero no se utilizó estos valores ya que era muy difícil ilustrar el análisis estructural con disipadores de energía TADAS.

Se aspira haber logrado el objetivo propuesto y de paso enseñar fotografías sobre el reforzamiento que se ha realizado en el Ex Parqueadero de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, que a no dudarlo servirá para replicar en otros reforzamientos estructurales.

REFERENCIAS

1. Abrahamson N., Greqor N., and Addo K., (2016) "BC Hydro ground motion prediction equations for subduction earthquakes", *Earthquake Spectra.*
2. ACI 318S-14 (2014), *Requisitos de reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-14)*. Preparado por el Comité ACI 318. American Concrete Instituto, 587 p.
3. Aguiar R., Del Castillo F., (2019), "Primeros trabajos en el reforzamiento sísmico de parqueadero de la ULEAM", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **24 (1)**, 1-32.
4. Aguiar R., (2018), "Análisis de disipadores TADAS utilizados en reforzamiento de Hospital Rodríguez Zambrano de Manta", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **23 (1)**, 1-28.
5. Aguiar R., Rodríguez M., Mora D., (2016, 1), *Análisis sísmico de estructuras con disipadores ADAS o TADAS,* Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería Sísmica CIMNE, **IS-73**, 174 p., Barcelona, España.
6. Aguiar R., Bozzo L., Mora D., Silva H., Caiza P., Coyago H., (2016, 2), "Protocolo de instalación de disipadores Shear Link Bozzo SLB40-3 y Placas Gusset en Bloque Estructural 4 de la UFA-ESPE", *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras,* **21 (2),** 127-150.
7. Aguiar R., Silva H., Coyago H., (2016, 3), "Desarrollo de un programa en Excel para diseñar placas Gusset. Aplicación a una estructura con disipadores de energía de UFA-ESPE", *Revista Ciencia,* **18 (3),** 353-380. Disponible en: http://www.revista_ciencia.espe.edu.ec
8. Aguiar R., (2014), *Análisis Matricial de Estructuras,* Instituto Panamericano de Geografía e Historia IPGH, cuarta edición, 676 p., Quito.
9. ASCE7 16, (2016), *Minimum design loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures,* American Society of Civil Engineers ASCE, Structural Engineering Institute SEI.
10. Beauval C., Marinière J., Yepes H., Audin L., Nocquet J-M., Alvarado A., Baize S., Aguilar J., Singaucho J.-C., Jomard H., (2018), "A new seismic

hazard model for Ecuador", *Bulletin of the Seismological Society of America*, doi:10.1785/0120170259.
11. Del Castillo D., (2018), *Reforzamiento estructural, presupuesto y bases técnicas del Edificio de Parqueadero de la ULEAM,* Tesis para obtener título de Ingeniero Civil. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, 160 pp. Manta.
12. Haendel A., Specht S., Kuehn N., and Scherbaum F, (2015), "Mixture of ground motion prediction equations as backbone models for a logic tree: an application to the subduction zone in Northern Chile", *Bulletin of Earthquake Engineering,* **13 (2),** 484-501.
13. Kotulka B. A. (2007), *Analysis for a design guide on Gusset Plates used in Special Concentrically Braced Frames.* University of Washington.
14. NEC-15 (2015) *Norma Ecuatoriana de la Construcción, SE-DS, Cargas Sísmicas. Diseño Sismo Resistente.* 138 p. Quito.
15. NEHRP (2009), Council, B. S. S., (2009), *NEHRP recommended seismica provisions for new buildings and other structures,* Federal Emergency Management Agency.
16. NEHRP (2015), *Recommended seismic provisions for new buildings and other structures,* Volume I: Part 1 Provisions, Part 2 Commentary. FEMA P-1050-1.
17. Norma Chilena NCh 3411 (2017), *Diseño sísmico de edificios con sistemas pasivos de disipación de energía-Requisitos y Métodos de Ensayo.* Primera Edición 2017.06.27.
18. Ordaz M., Martinelli F., D'Amico V., and Maletti C., (2013), "CRISIS2008: A flexible tool to perform probabilistic seismic hazard assessment", *Seismological Research Letters,* **84 (3),** 495-504.
19. Parra H., (2016), *Desarrollos metodológicos y aplicaciones hacia el cálculo de la Peligrosidad Sísmica en el Ecuador continental y estudio de riesgo sísmico en la ciudad de Quito,* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
20. Rivas A., (2016), *Estudio de Peligrosidad Sísmica para Empresa Molinos Superior de la ciudad de Manta,* Consultoría, 30 p.
21. Zhao J., Zhang J., Asano A., Ohno Y., Ouchi T., Takahashi T., … and Fukushima Y., (2006), "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period", *Bulletin of the Seismological Society of America,* **96 (3),** 898-913.